



L'esperimento ALICE

2022 ALICE Masterclass

Francesca Ercolessi

Nicola Rubini

Sofia Strazzi

Pietro Antonioli



L'acceleratore LHC

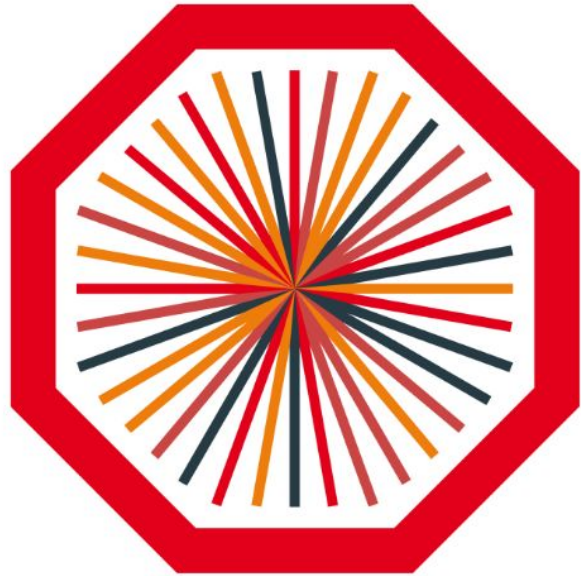
Il *Large Hadron Collider* (LHC) è un acceleratore di adroni che si estende per circa 27 km

Gli adroni si muovono ad una velocità prossima a quella della luce in direzioni opposte e vengono fatti scontrare in 4 punti di collisione, in cui sono localizzati i 4 esperimenti:

- ATLAS
- CMS
- LHCb
- **ALICE**



L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

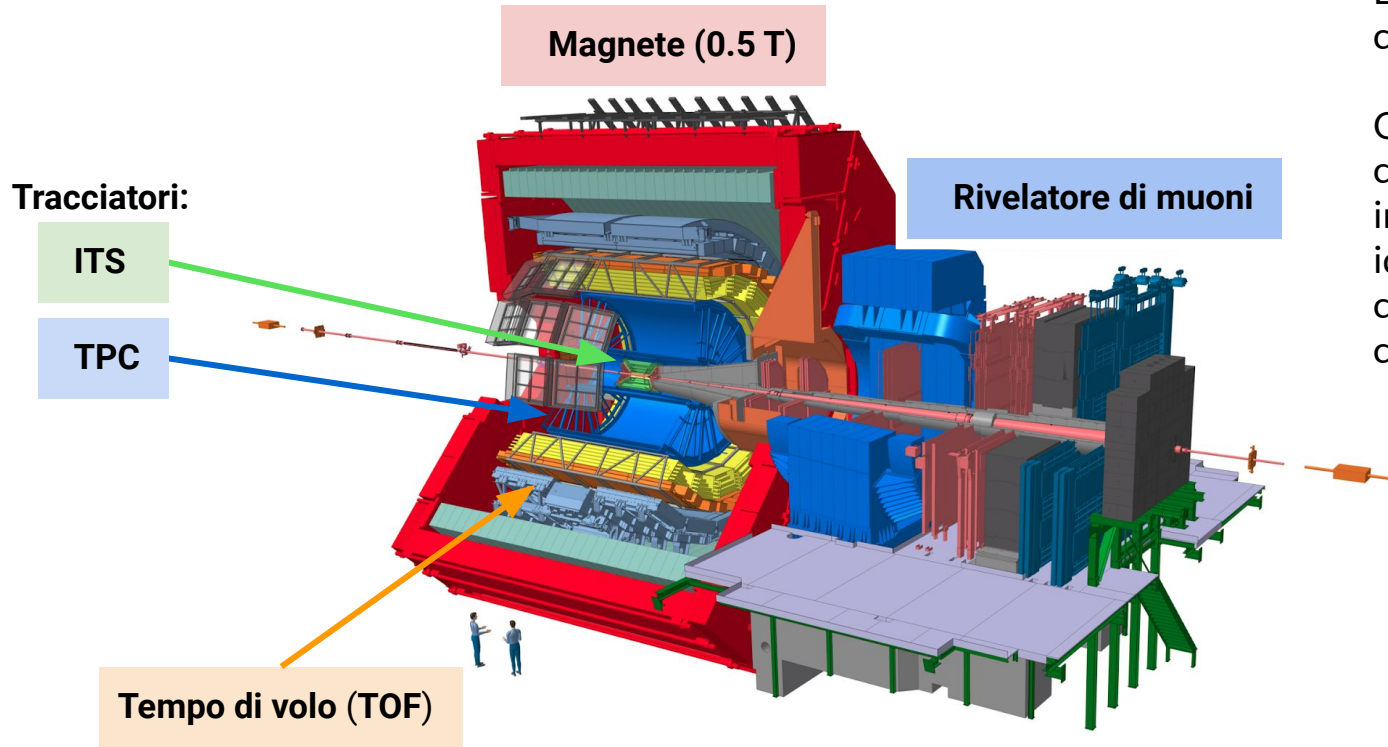


ALICE

A JOURNEY OF DISCOVERY



L'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment)



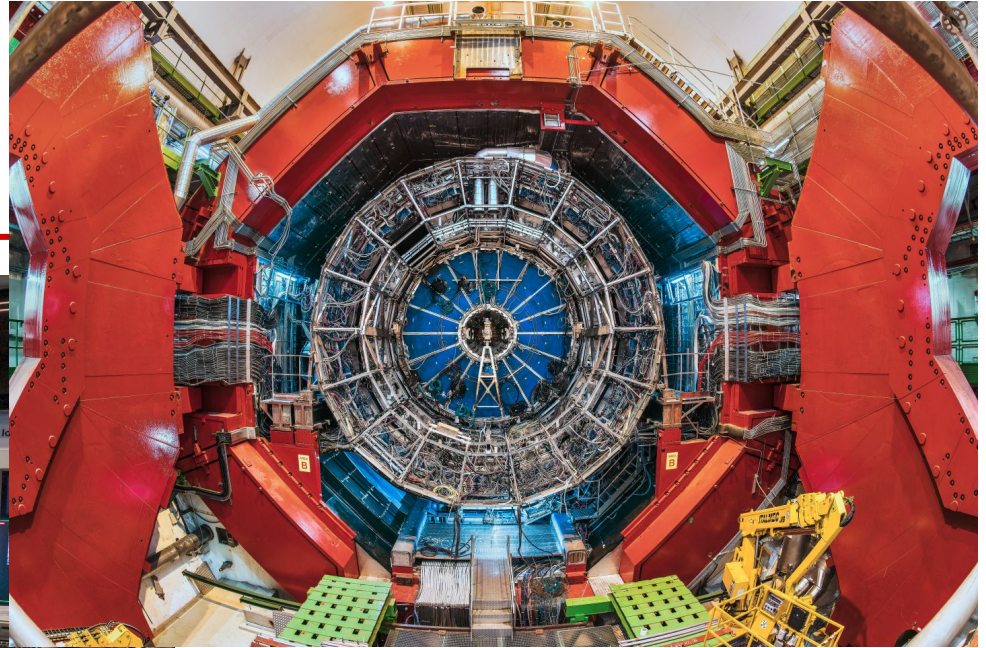
L'esperimento ALICE è composto da vari rivelatori

Ognuno di questi contribuisce a fornire informazioni chiave per identificare le particelle che vengono create nelle collisioni

ALICE da vicino

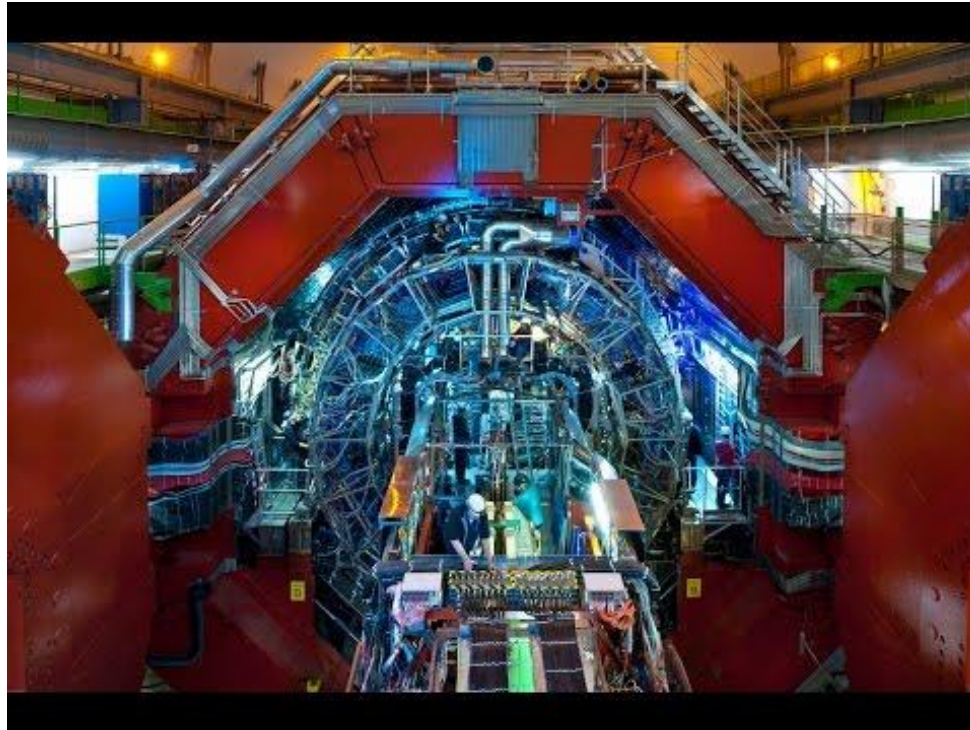
<https://www.youtube.com/watch?v=yWBWzIUCNpw>

ALICE control room

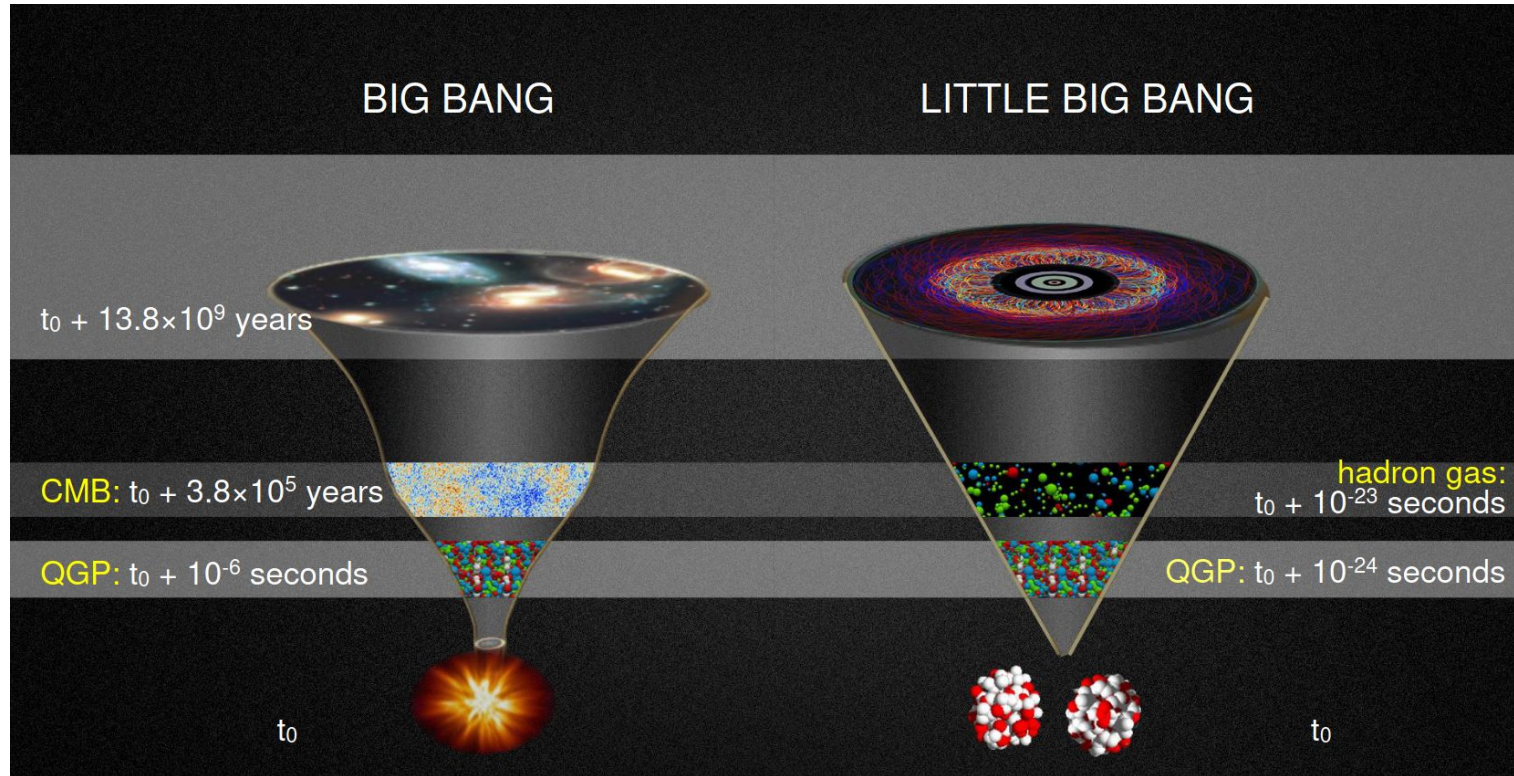


ALICE cavern

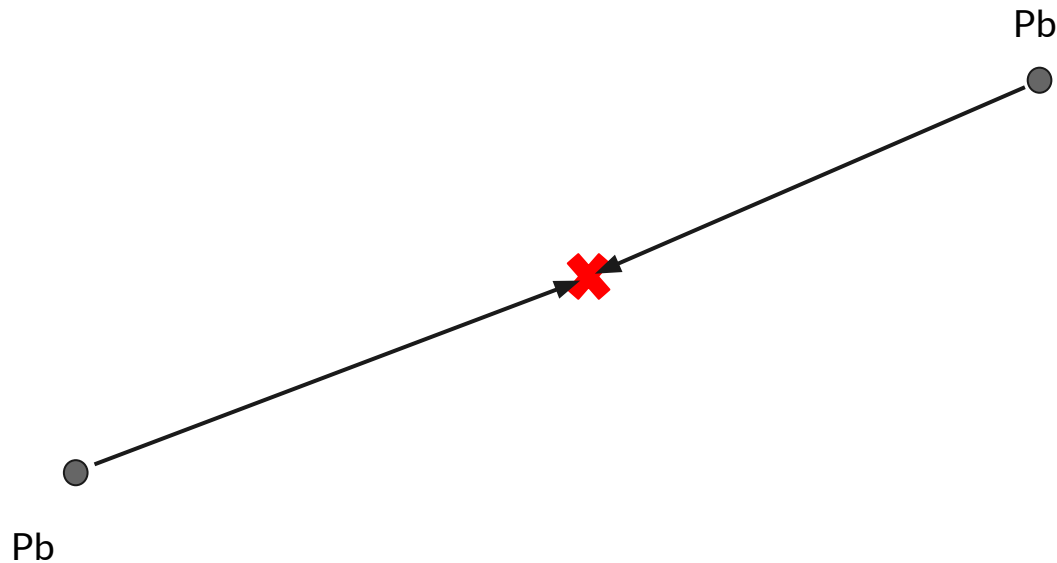
ALICE da vicino



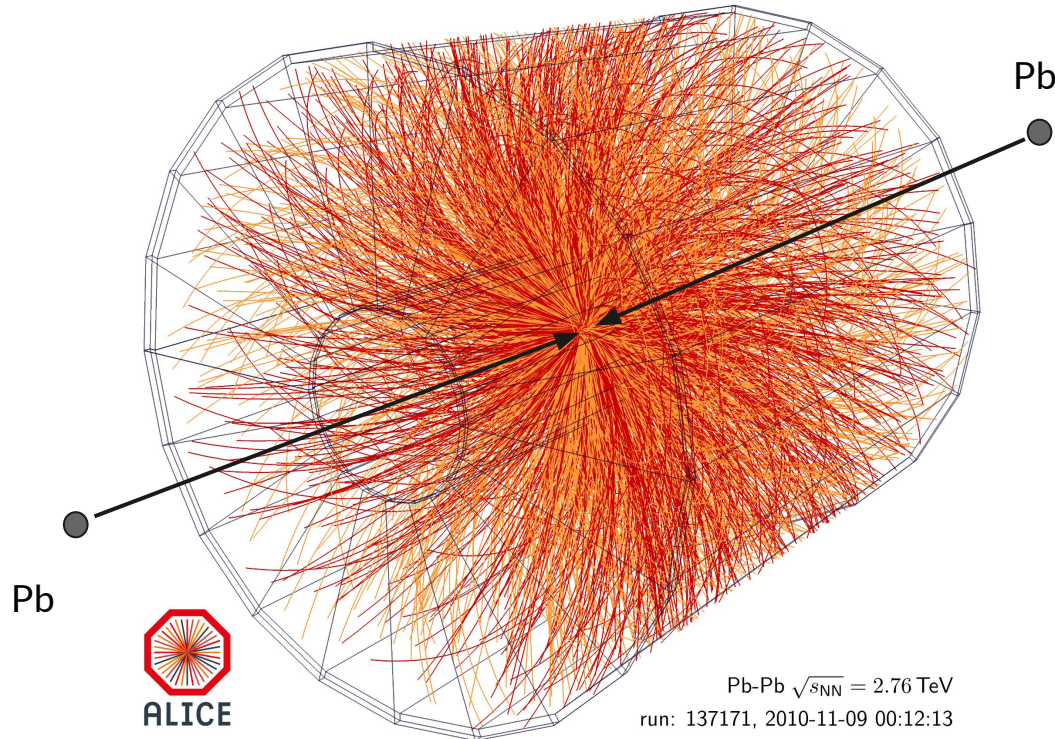
Big (little) BANG!



Come si presentano prodotti di questa collisione?



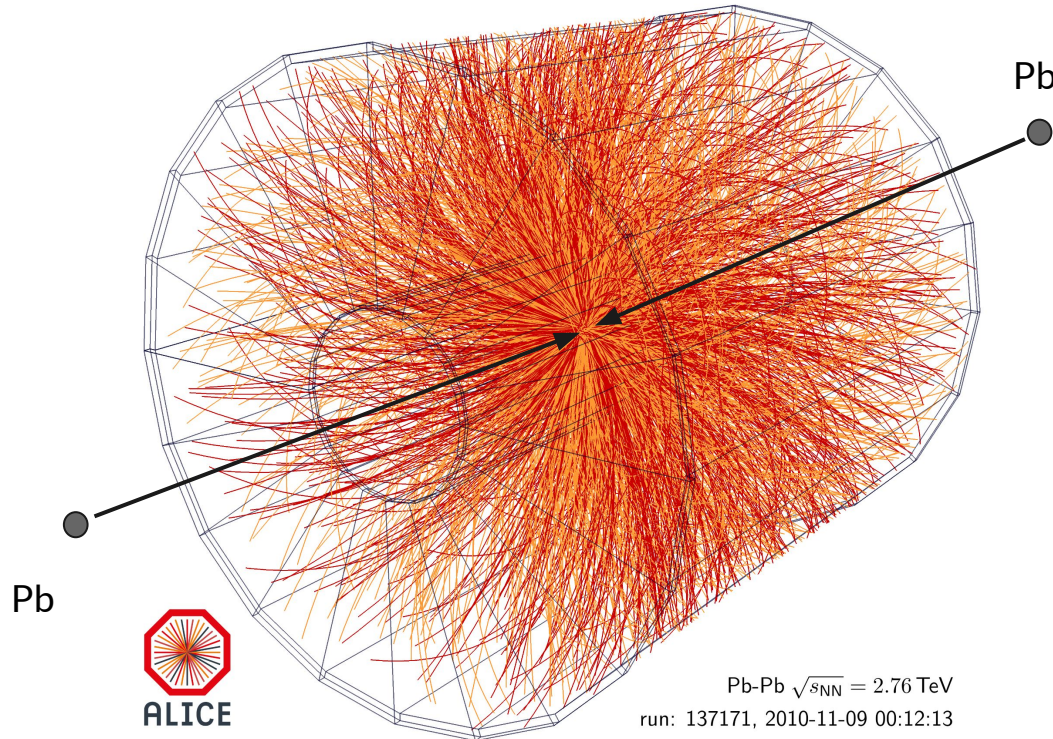
Come si presentano prodotti di questa collisione?



Event display:
migliaia di tracce!

Come riconoscere per ognuna
queste tracce di quale
particella di tratta?

Come si presentano prodotti di questa collisione?

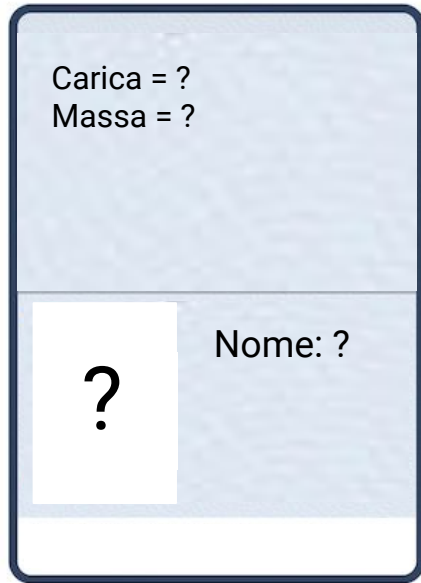


Event display:
migliaia di tracce!

Come riconoscere per ognuna
queste tracce di quale
particella di tratta?



Cosa significa identificare una particella



Per identificare una particella dobbiamo conoscerne *carica* e *massa*

carica:

misura diretta → curvatura della traccia nel campo magnetico

massa:

misura indiretta → tramite **impulso** e **velocità** della particella

Impulso di una particella

Per “impulso” intendiamo la quantità di moto di una particella che in fisica classica è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Quando però il modulo della velocità v è vicino alla velocità della luce c gli effetti relativistici non sono trascurabili e la formula corretta è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

$$\beta = v/c$$

In fisica delle particelle lavoriamo utilizzando un'unità di misura più “comode”

- Energia = espressa in elettronvolt (eV) o suoi multipli (keV, MeV, GeV)

Energia acquisita da un elettrone che si muove nel vuoto tra due punti tra i quali c'è una differenza di potenziale elettrostatico di 1 volt. **1eV ~ 1,6 x 10⁻¹⁹ J**

Impulso di una particella

Per “impulso” intendiamo la quantità di moto di una particella che in fisica classica è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

Quando però il modulo della velocità v è vicino alla velocità della luce c gli effetti relativistici non sono trascurabili e la formula corretta è:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

$$\beta = v/c$$

In fisica delle particelle lavoriamo utilizzando un'unità di misura più “comode”

- Energia = espressa in elettronvolt (eV) o suoi multipli (keV, MeV, GeV)
- Impulso = Energia / velocità = eV/c
- Massa = Energia / velocità² = eV/c²

Particella carica in un campo magnetico

Una particella carica (per esempio un protone) che si muove all'interno di un campo magnetico $\vec{B}$ è soggetta alla Forza di Lorentz:

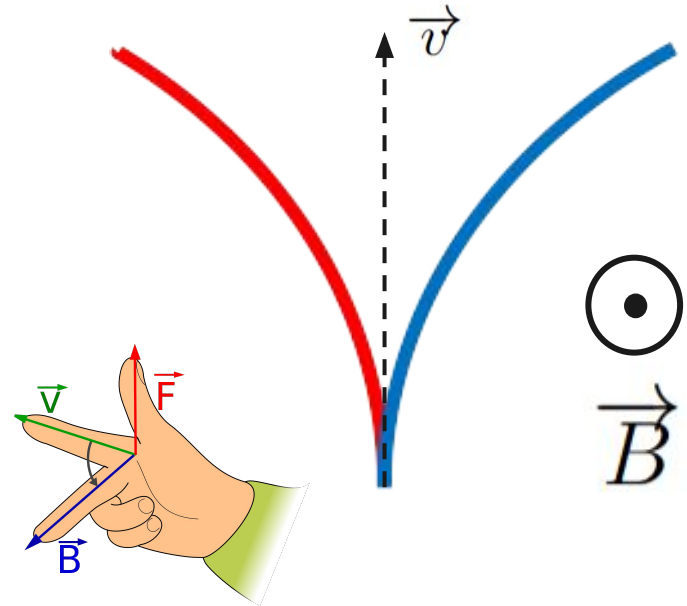
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

La forza è sempre ortogonale al campo magnetico e alla velocità

Il segno della carica decide il verso della forza

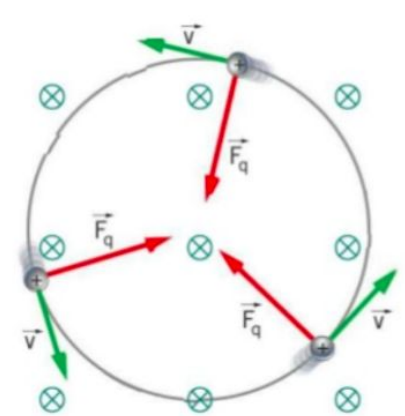
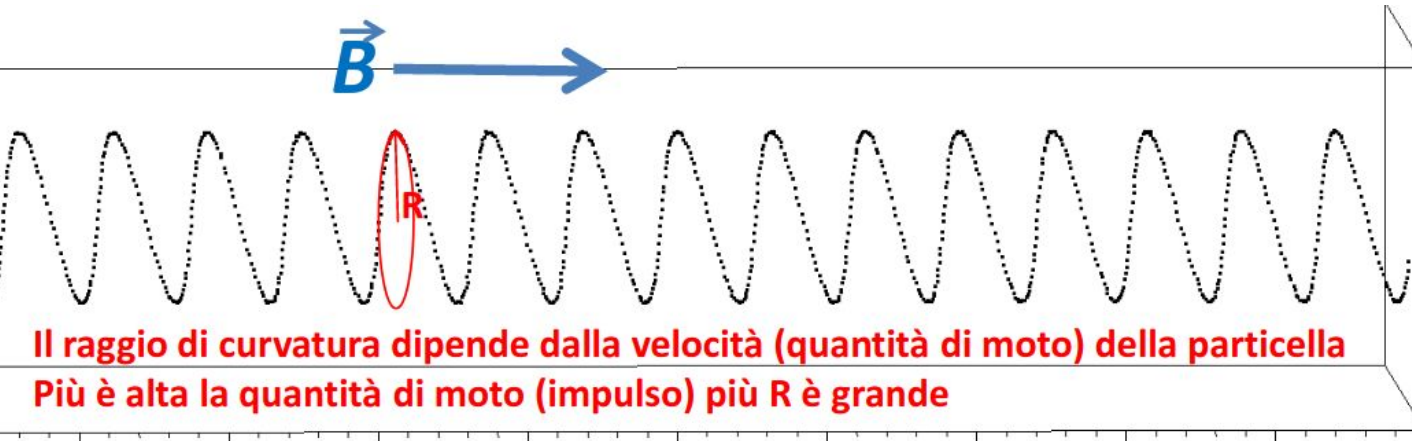
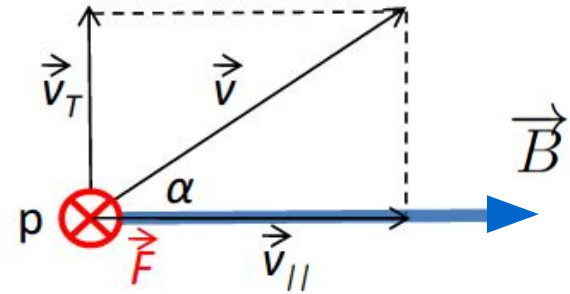
Particella con carica **negativa**

Particella con carica **positiva**



Il moto elicoidale

- moto circolare uniforme nella proiezione perpendicolare a $\vec{B}$
- moto uniforme lungo $\vec{B}$



Come si misura l'impulso della particella

La traiettoria di una particella carica all'interno di un campo magnetico è **elicoidale**

NB: normalmente le particelle prodotte nella collisione hanno impulsi elevati $\rightarrow R \gg 1$ m, maggiore delle dimensioni del rivelatore (qualche metro), quindi percorrono solo un arco all'interno dell'esperimento

Il raggio di curvatura del moto circolare dovuto alla forza di Lorentz si ricava dalla relazione:

Forza centripeta

$$\frac{mv^2}{R} \hat{r} = \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

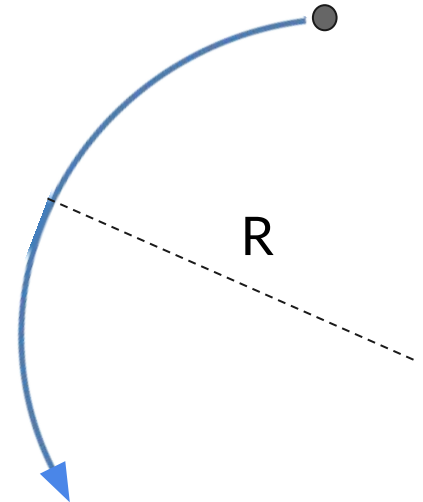
Forza di Lorentz

Se misuro ...

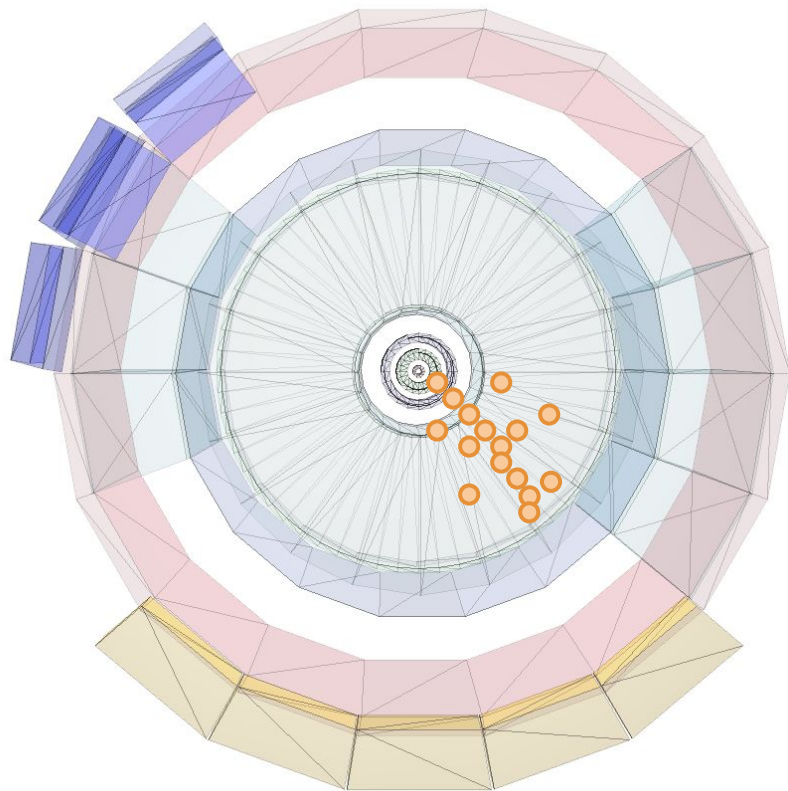
$$R = \frac{p_T}{0.3B}$$

... ricavo

Con p_T espresso in GeV/c, B in Tesla.



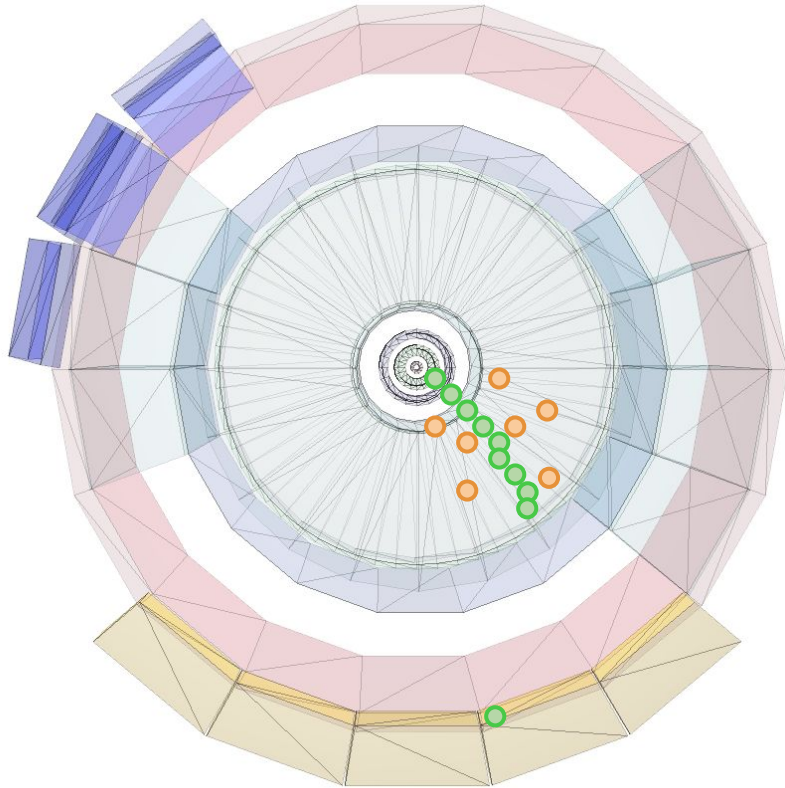
Ricostruzione delle tracce in ALICE



Al passaggio di un particella:

- diversi segnali sono stati rivelati nei tracciatori
- i segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi ... per esempio con una traiettoria curva

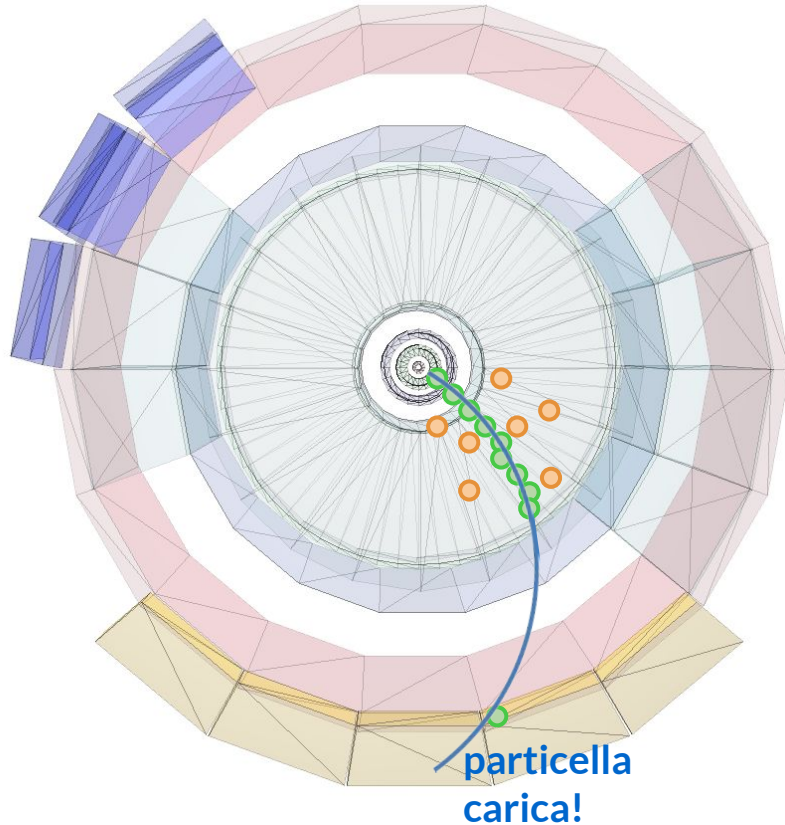
Ricostruzione delle tracce in ALICE



Al passaggio di un particella:

- diversi segnali sono stati rivelati nei tracciatori
- i segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi ... per esempio con una traiettoria curva

Ricostruzione delle tracce in ALICE



Al passaggio di un particella:

- diversi segnali sono stati rivelati nei tracciatori
- i segnali sono associati da algoritmi in base a criteri di consistenza con alcune ipotesi ... per esempio con una traiettoria curva
- una traccia ricostruita che viene dal vertice interno è associata ad una particella carica
- dal raggio di curvatura si ricava l'impulso

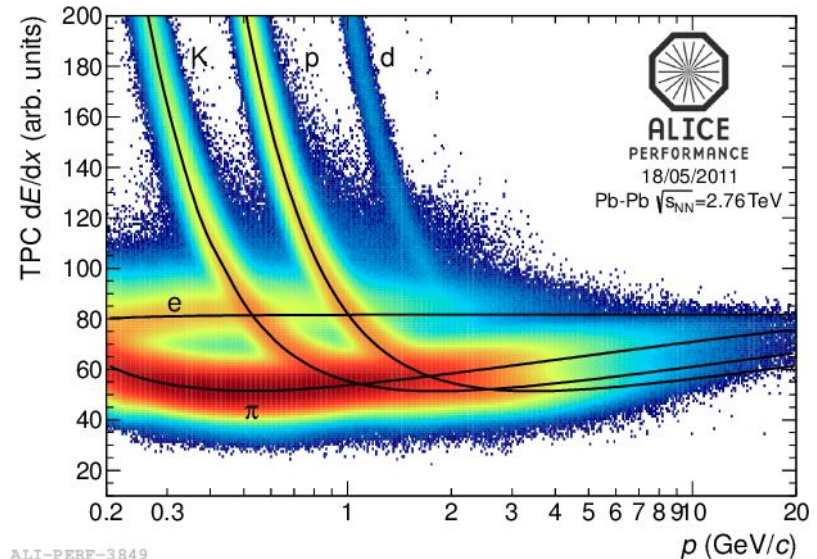
$$p_T = R \cdot 0.3 \cdot B$$

Come si misura la velocità della particella

A parità di impulso particelle diverse si muovono a velocità diversa

Le tecniche che sfrutta ALICE per misurare la velocità principali sono:

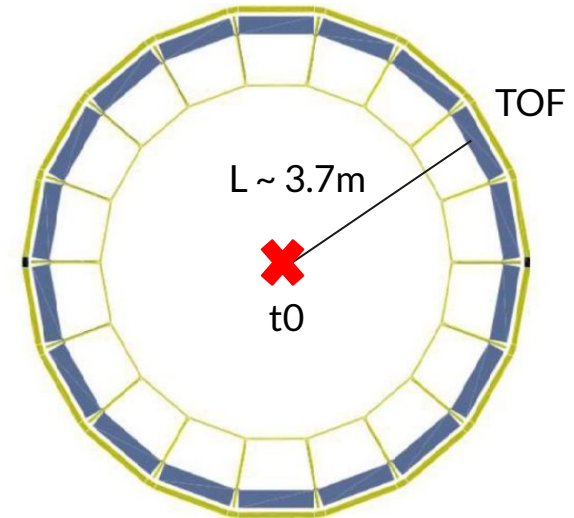
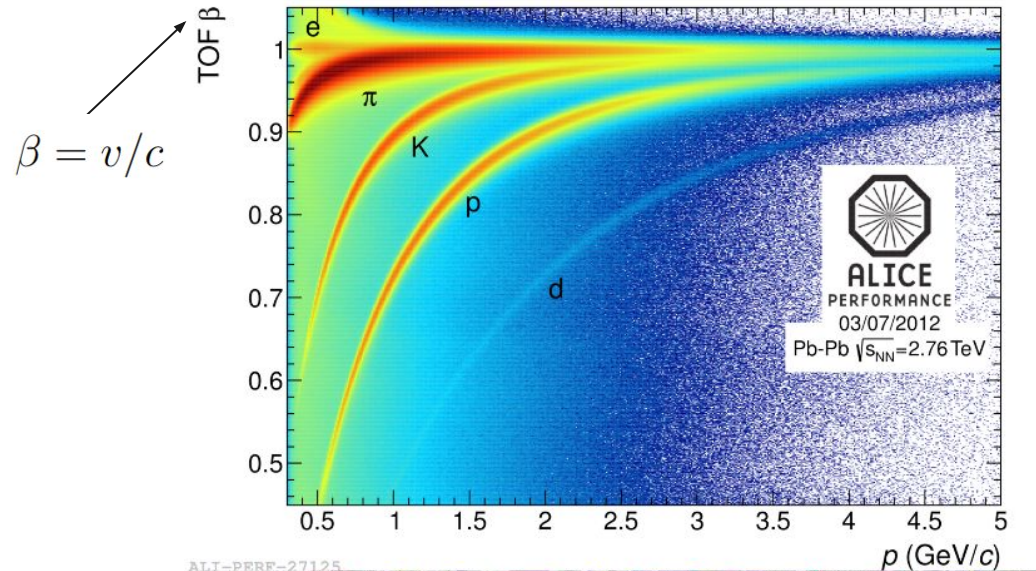
- **Perdita di energia** nel materiale del rivelatore da una particella
- **Tempo di volo:** misura diretta della velocità
- **Emissione di luce Cherenkov:**
la velocità della luce in un materiale dipende dall'indice di rifrazione, se la particella si muove più veloce di c/n emette un cono di luce



Rivelatore a tempo di volo TOF

Misura il **tempo di volo**: tempo impiegato da una particella per percorrere la distanza tra il vertice di interazione e la superficie del rivelatore

$$v = \frac{L}{t_{TOF}}$$



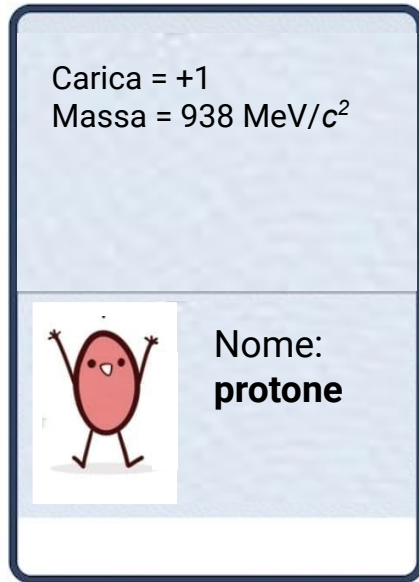
Quanto preciso?



Il TOF raggiunge **risoluzioni temporali di 56ps!**

Un campo da pallavolo in cui sai quando la palla cade a terra con una precisione di 0.000000000056 secondi (56 ps)

Cosa significa identificare una particella



Per identificare una particella dobbiamo conoscerne *carica* e *massa*

carica:

misura diretta → curvatura della traccia nel campo magnetico

massa:

misura indiretta → tramite **impulso** e **velocità** della particella

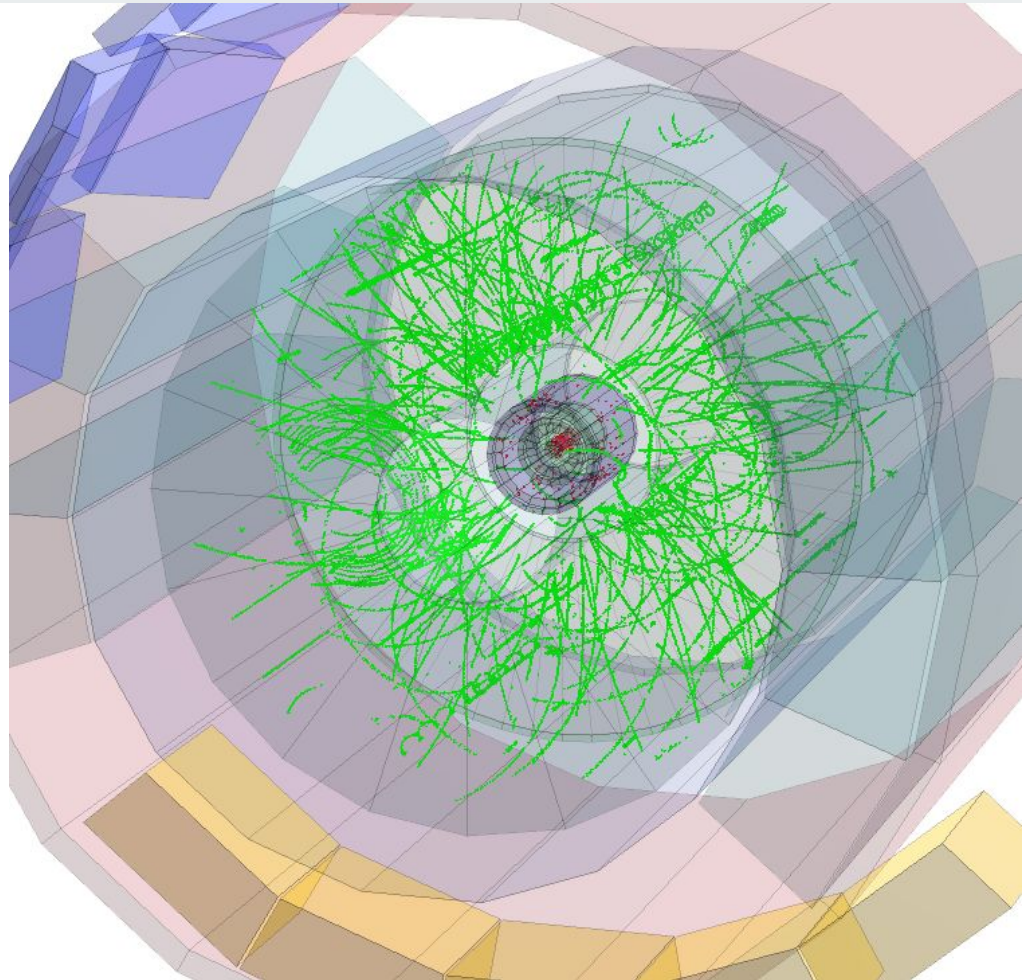
$$m = \frac{p}{\beta \cdot \gamma \cdot c}$$

$$\beta = v/c$$

Event display

Event display = un evento di collisione come visto dal nostro rivelatore

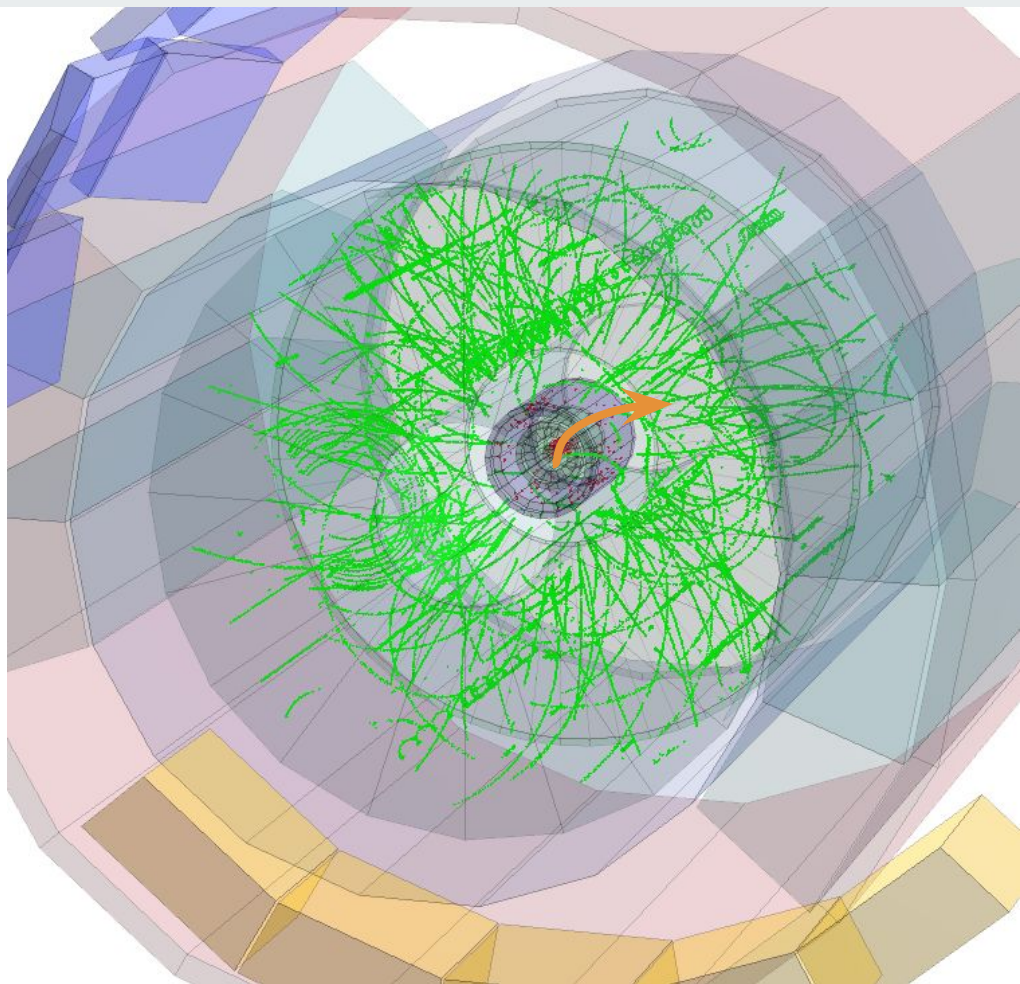
- in **rosso** i segnali misurati dal tracciatore interno (ITS, *Inner Tracking System*)
- in **verde** i segnali misurati dal tracciatore principale (TPC, *Time Projection Chamber*)



Event display

Event display = un evento di collisione come visto dal nostro rivelatore

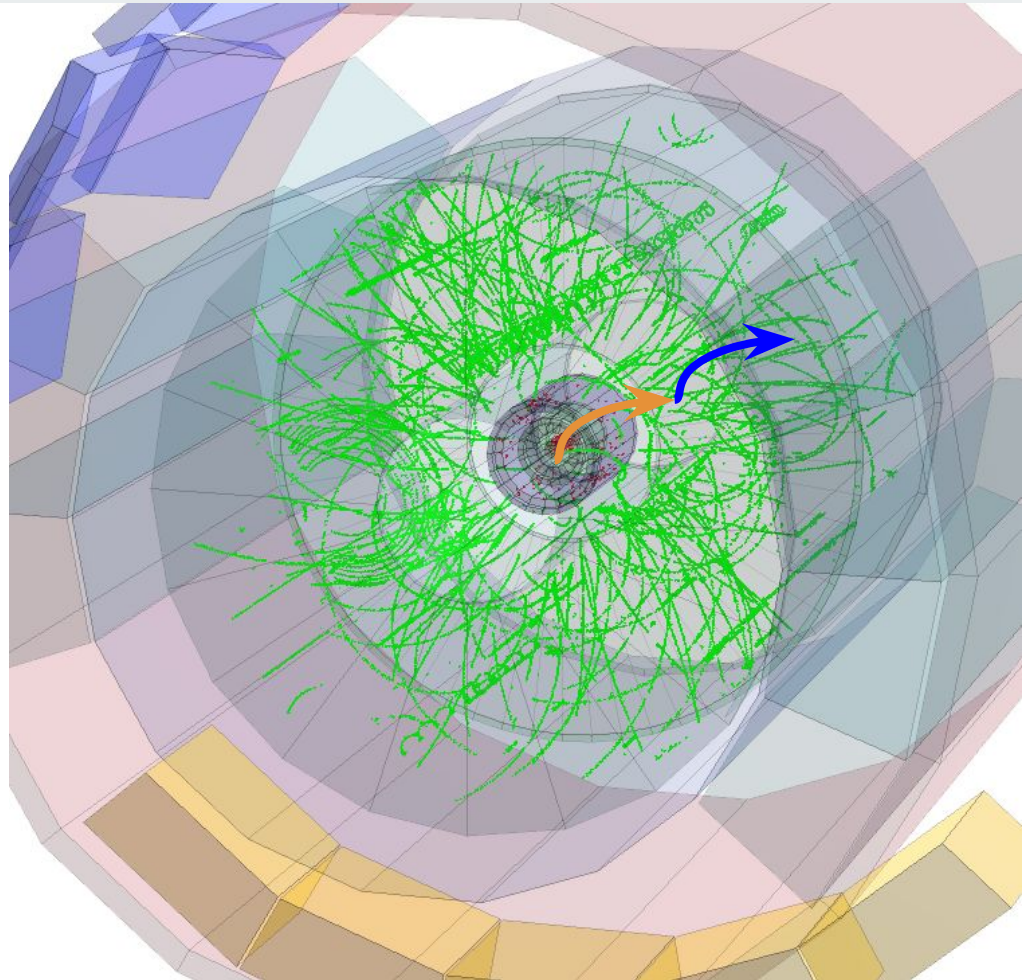
- **Particelle primarie:** archi che puntano al “vertice primario” (dove è avvenuta la collisione)



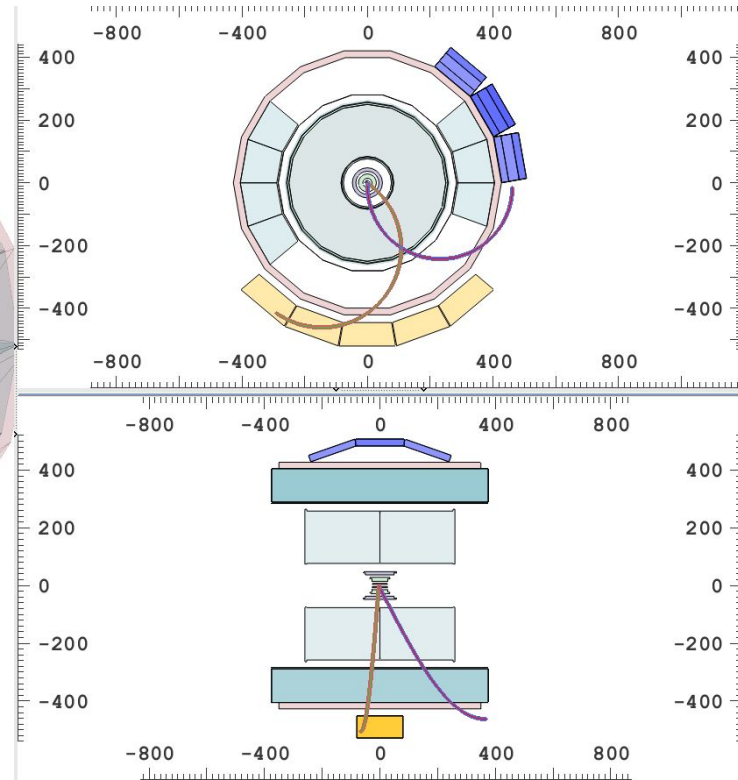
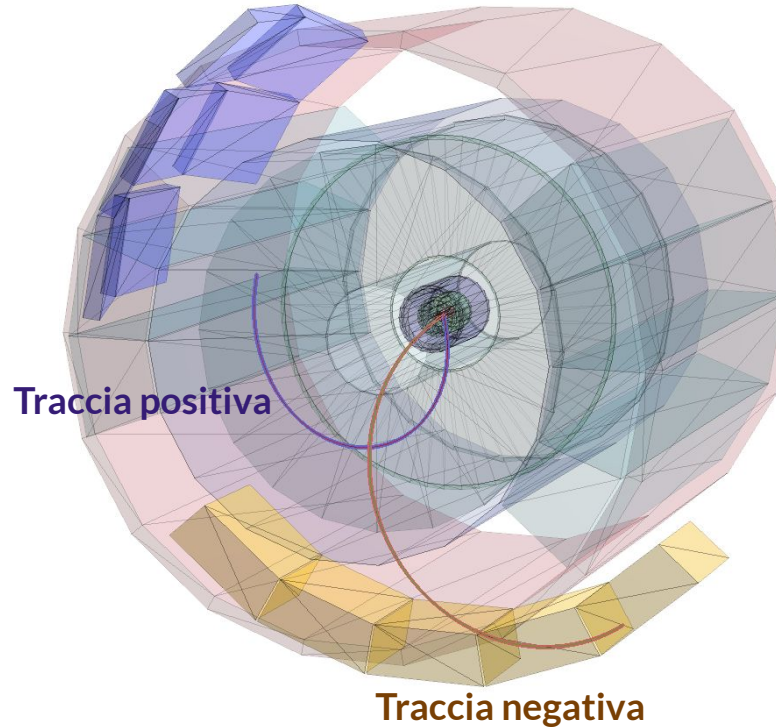
Event display

Event display = un evento di collisione come visto dal nostro rivelatore

- **Particelle primarie:**
archi che puntano al “vertice primario” (dove è avvenuta la collisione)
- **Particelle secondarie:**
archi che partono più esternamente da un “vertice secondario” (dove è avvenuto un decadimento)

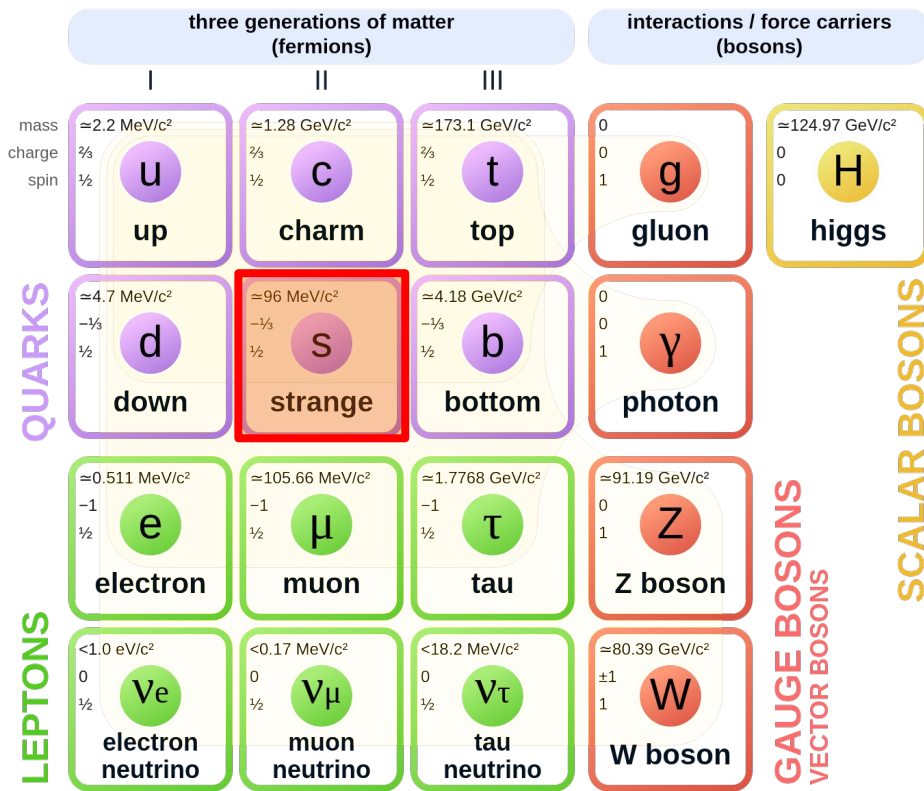


Event display



Che strana la fisica!

Standard Model of Elementary Particles



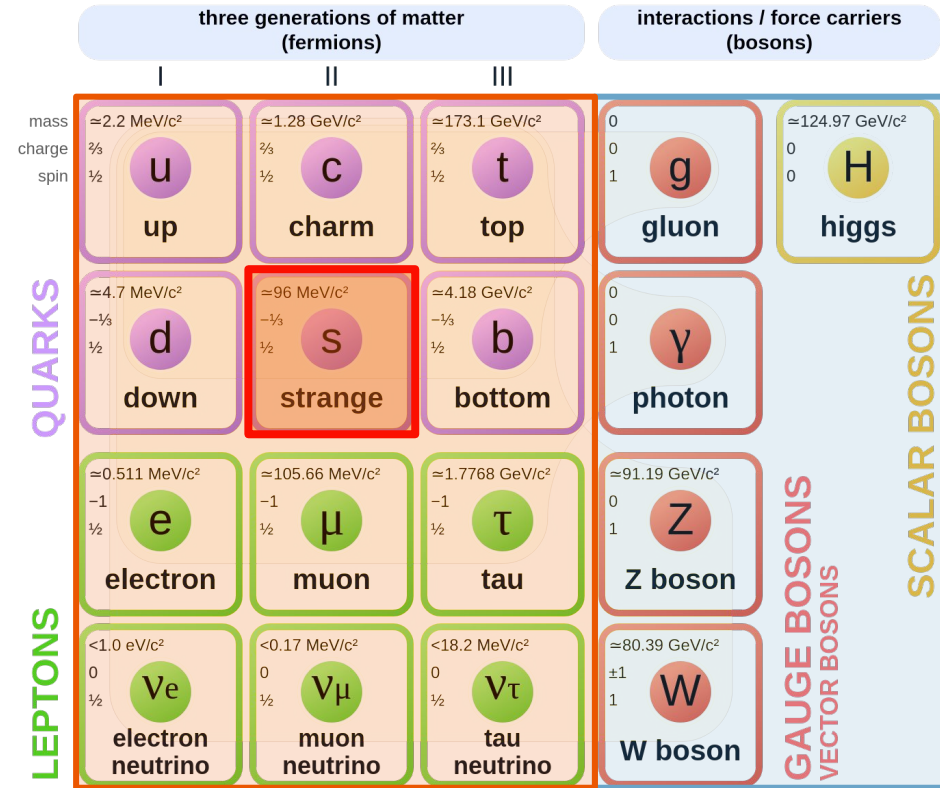
Modello Standard

Descrive tre delle quattro **interazioni fondamentali**:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

e tutte le **particelle elementari**!

Standard Model of Elementary Particles

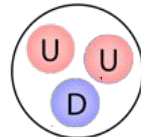
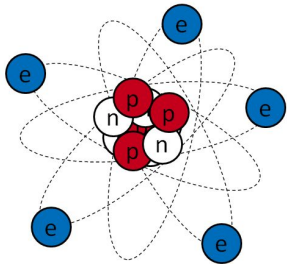


Modello Standard

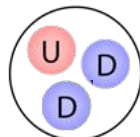
Descrive tre delle quattro
interazioni fondamentali:

1. Forte
2. Elettromagnetica
3. Debole

e tutte le **particelle elementari!**
Ma quante sono? Nella **materia ordinaria** solo tre...

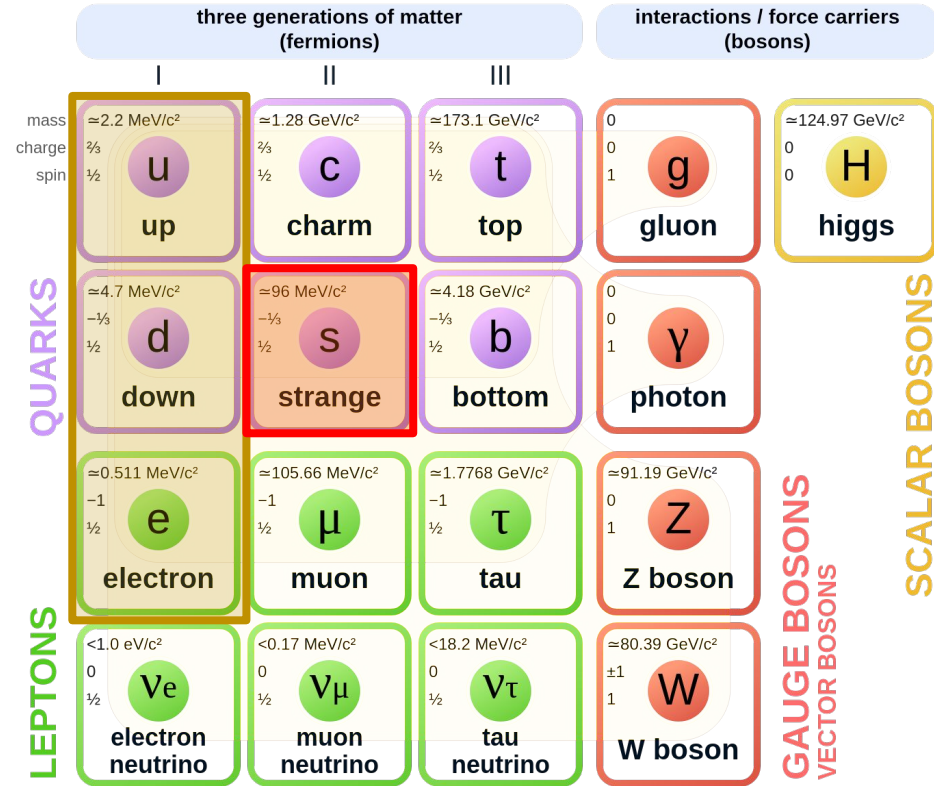


Proton



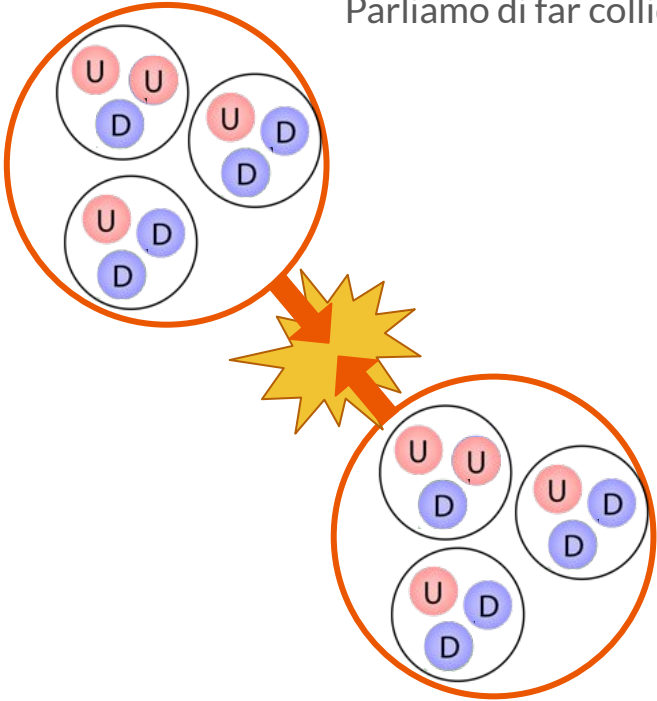
Neutron

Standard Model of Elementary Particles



Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

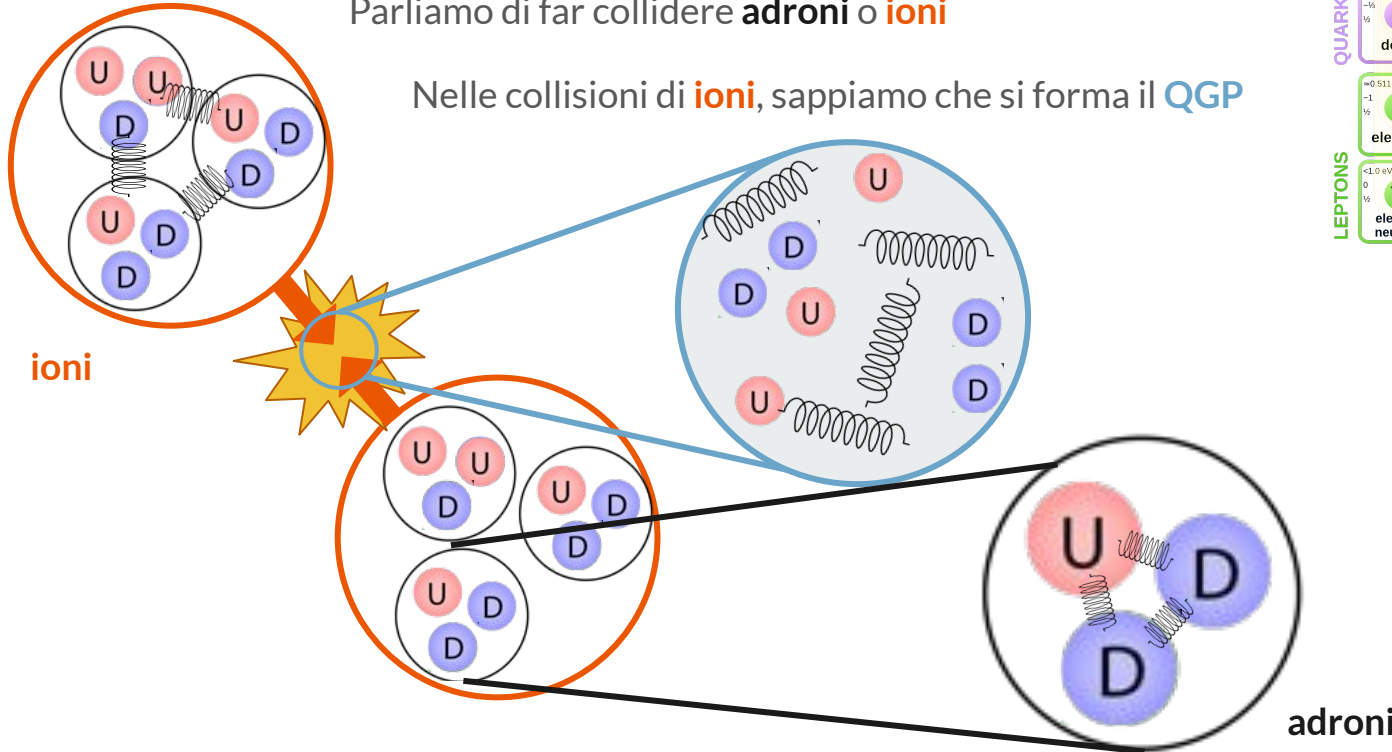
Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**



Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma

Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Nelle collisioni di **ioni**, sappiamo che si forma il **QGP**



Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I		II		III			
mass charge spin							
$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	t top	0 1 1	g gluon
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	b bottom	0 1 1	γ photon
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	τ tau	0 1 1	Z Z boson
$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	W W boson
							H higgs
							$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0

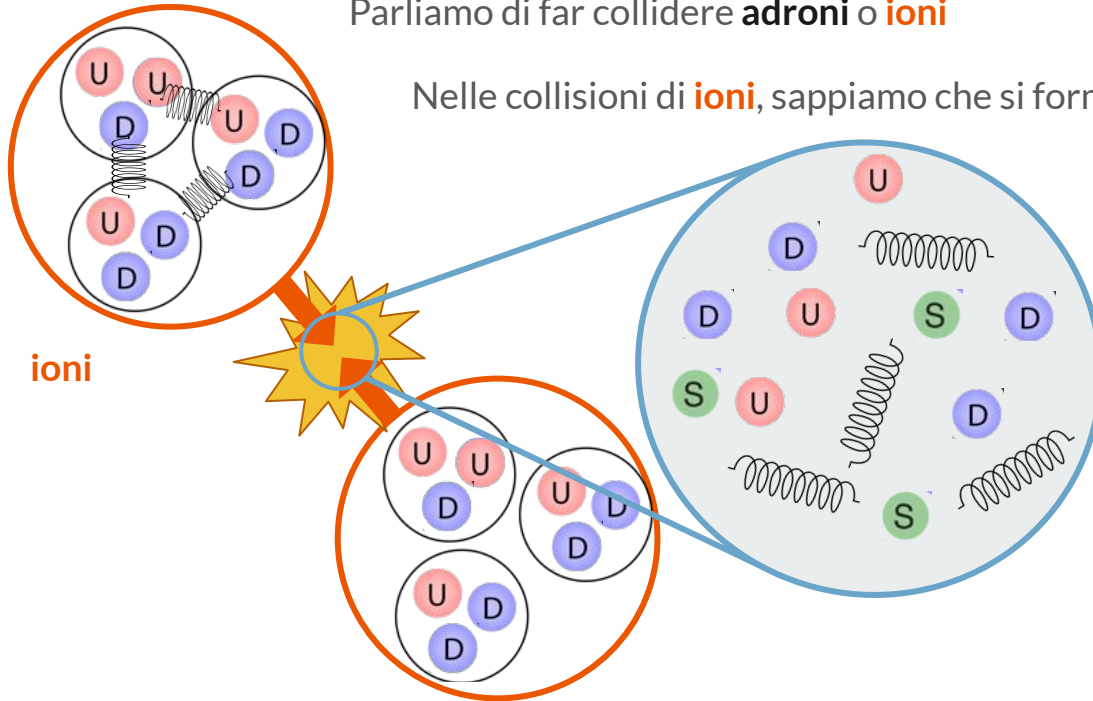
QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

Collisioni adroniche: Quark Gluon Plasma



Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Nelle collisioni di **ioni**, sappiamo che si forma il **QGP**

QGP

Il **QGP** è un agglomerato di quark e gluoni slegati tra loro, diversamente da come sono negli **adroni**

Nel **QGP** si formano anche quark, come il quark **strange** che non sono presenti nello stato iniziale, negli **adroni** o **ioni** che facciamo collidere.

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
I	II	III		
mass charge spin ≈ 2.2 $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ U	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 1 0 g gluon	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H higgs
≈ 4.7 $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ D	≈ 96 $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ S strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 1 0 γ photon	
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	
$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	

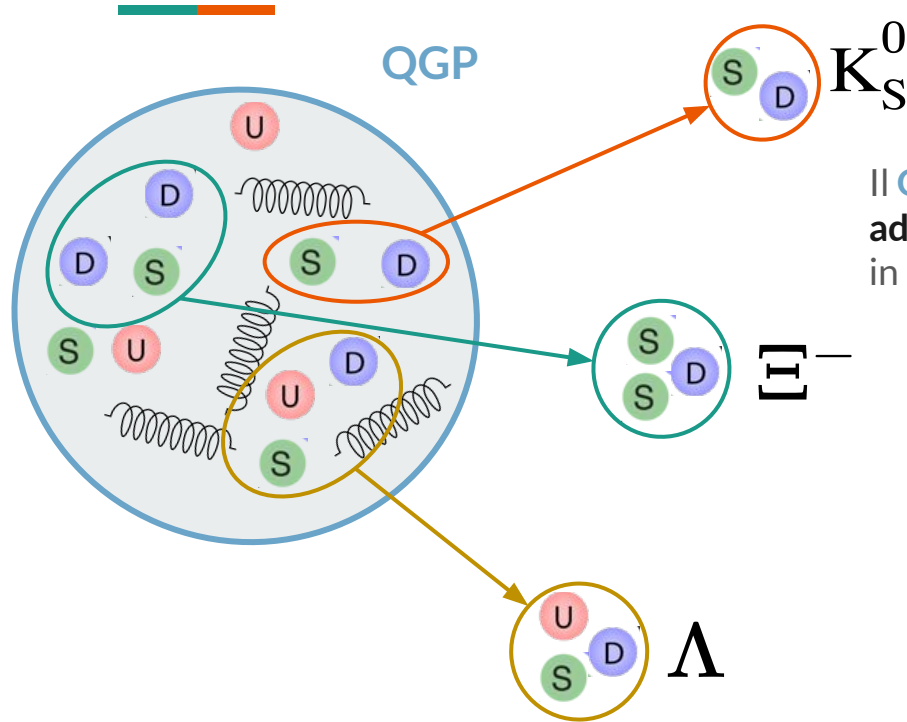
QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

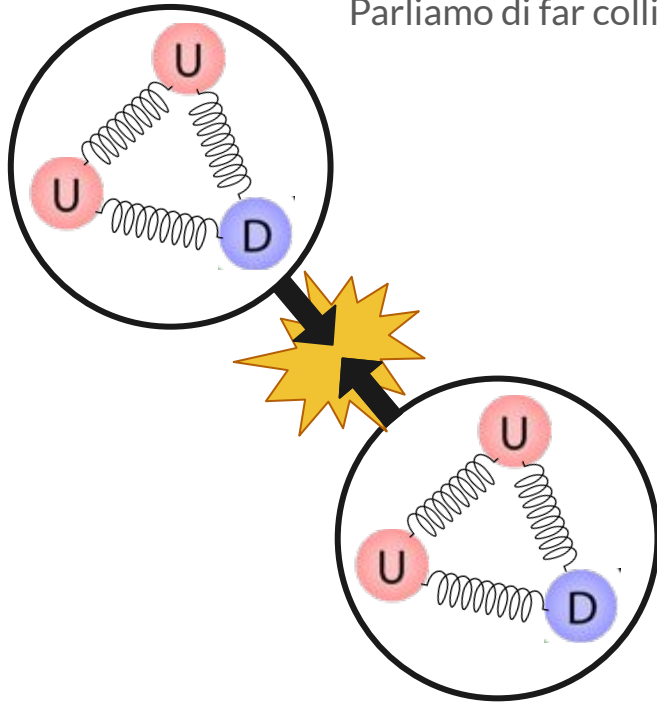


Il **QGP** produce diversi **adroni strani** che vediamo in uscita dalla collisione!

Standard Model of Elementary Particles

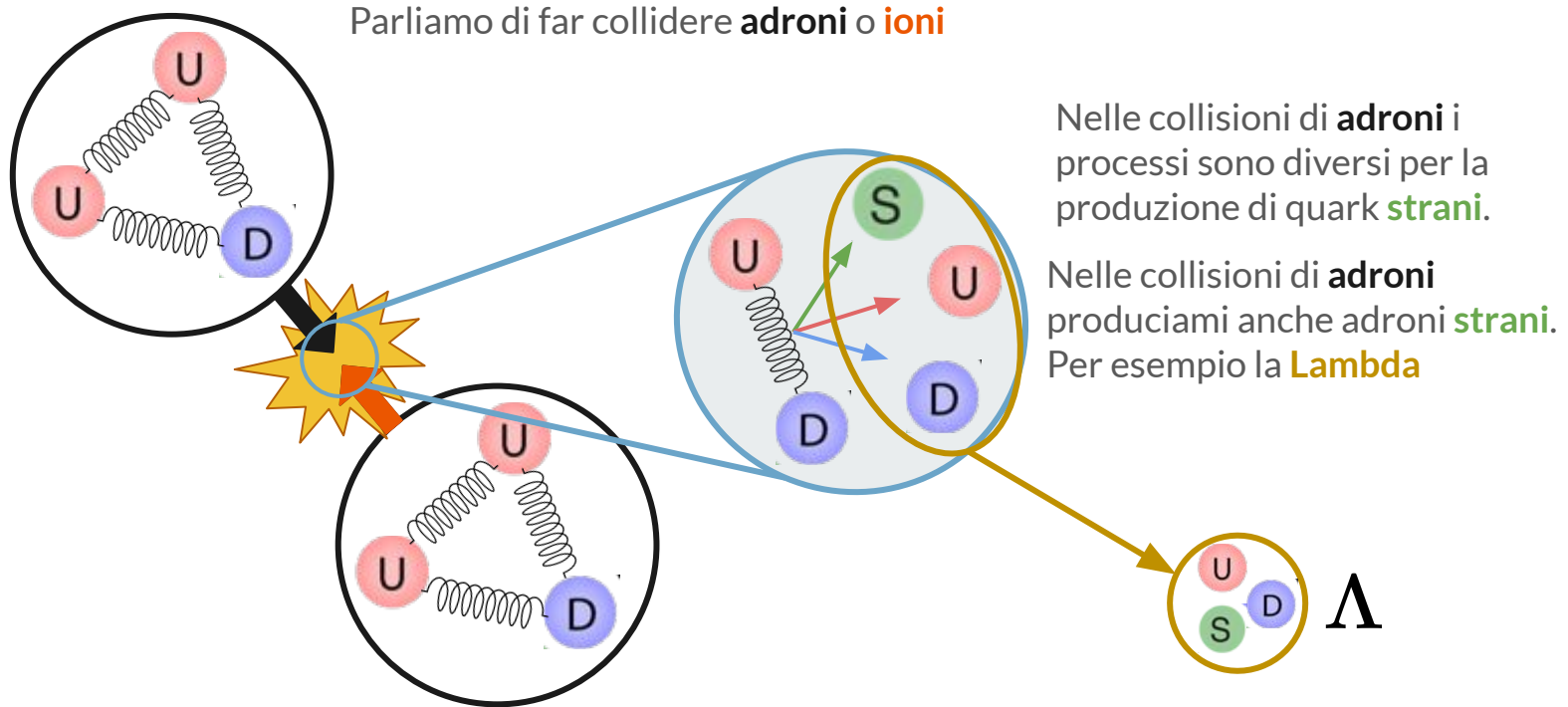
three generations of matter (fermions)						interactions / force carriers (bosons)	
I			II			III	
mass charge spin							
$\approx 2.2 \times 10^{-30}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	U		$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	c charm		$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	t top
$\approx 4.7 \times 10^{-32}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	D		$\approx 96 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	S strange		$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	b bottom
QUARKS							
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 0	e electron		$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 0	μ muon		$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 0	τ tau
$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	ν_e electron neutrino		$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	ν_μ muon neutrino		$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	ν_τ tau neutrino
LEPTONS							
0 1 0	g gluon		0 1 0	γ photon		$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	Z Z boson
0 1 0	W W boson		0 1 0	W W boson		$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	H higgs
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS						SCALAR BOSONS	

Collisioni adroniche: Produzione di stranezza

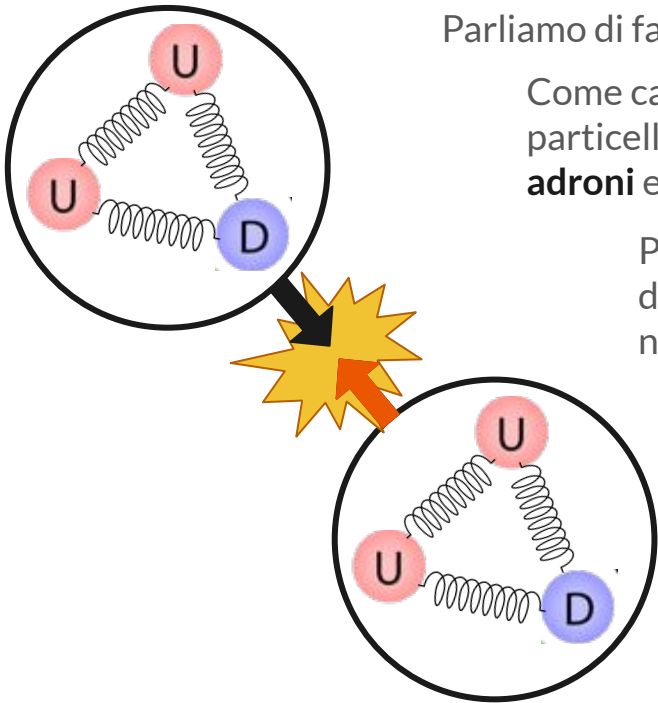


Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Collisioni adroniche: Produzione di stranezza



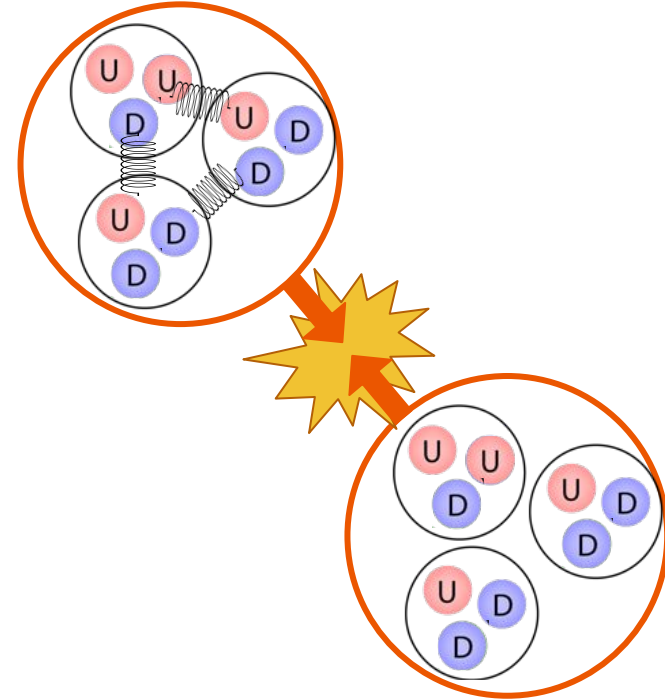
Collisioni adroniche: Aumento di stranezza



Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Come cambia la produzione di particelle **strane** tra collisioni di **adroni** e collisioni di **ioni**?

Possiamo paragonare la produzione di particelle **strane** scalando per il numero di partecipanti... cioè?

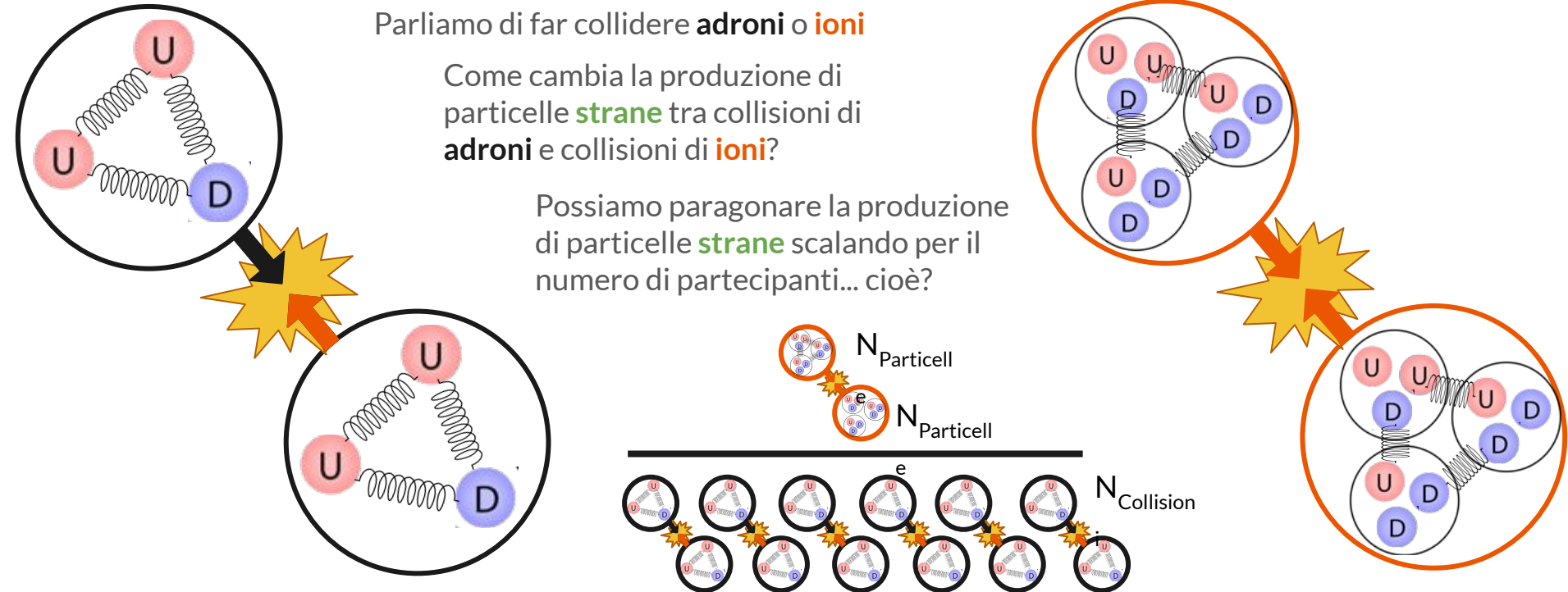


Collisioni adroniche: Aumento di stranezza

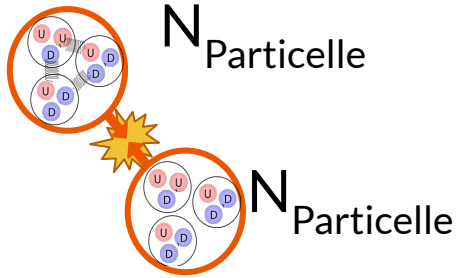
Parliamo di far collidere **adroni** o **ioni**

Come cambia la produzione di particelle **strane** tra collisioni di **adroni** e collisioni di **ioni**?

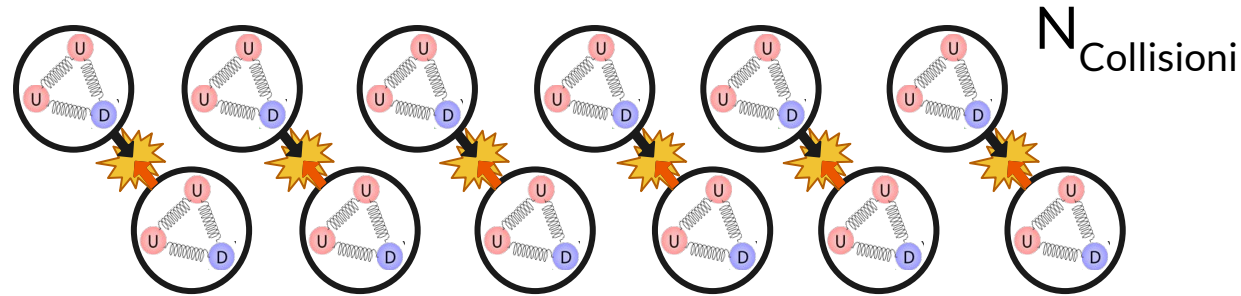
Possiamo paragonare la produzione di particelle **strane** scalando per il numero di partecipanti... cioè?



Collisioni adroniche: Aumento di stranezza



$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} > 1$$

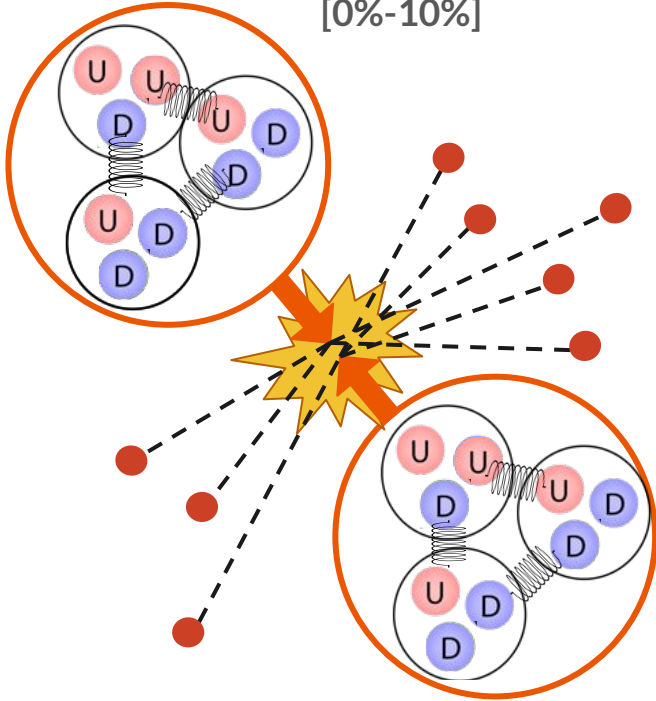


$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} = 1$$

Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



[0%-10%]

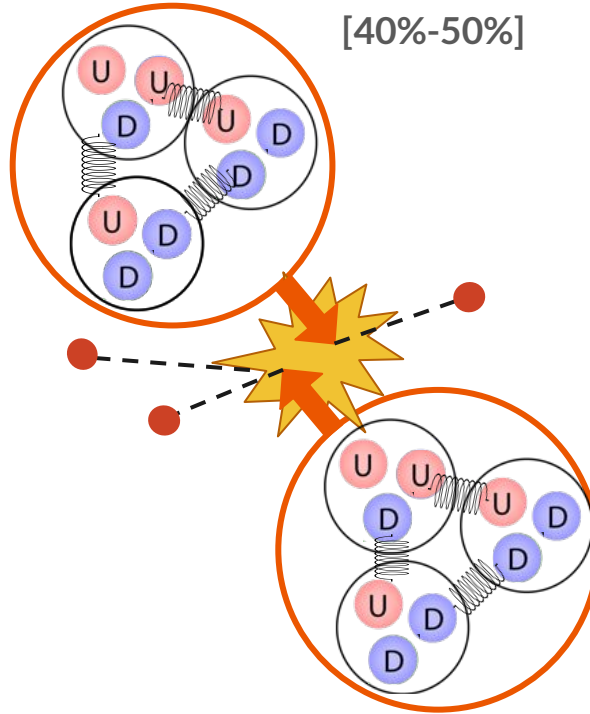
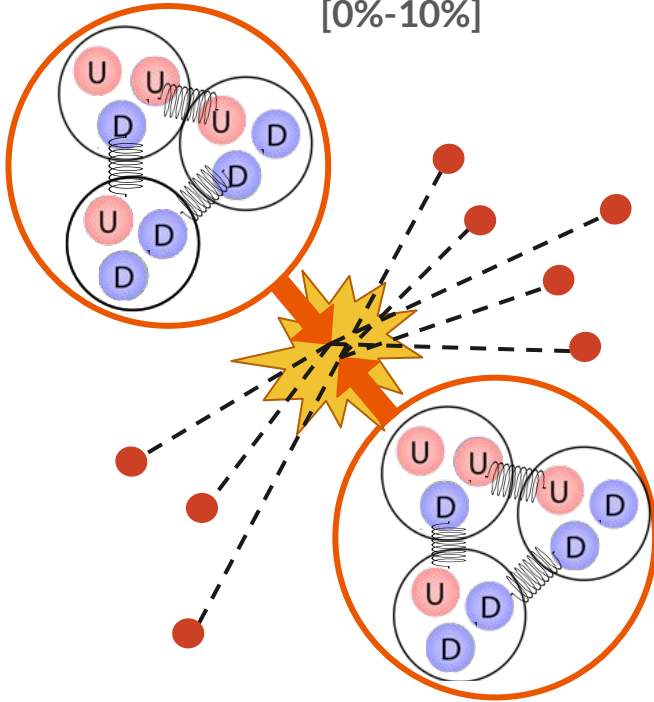


Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



[0%-10%]

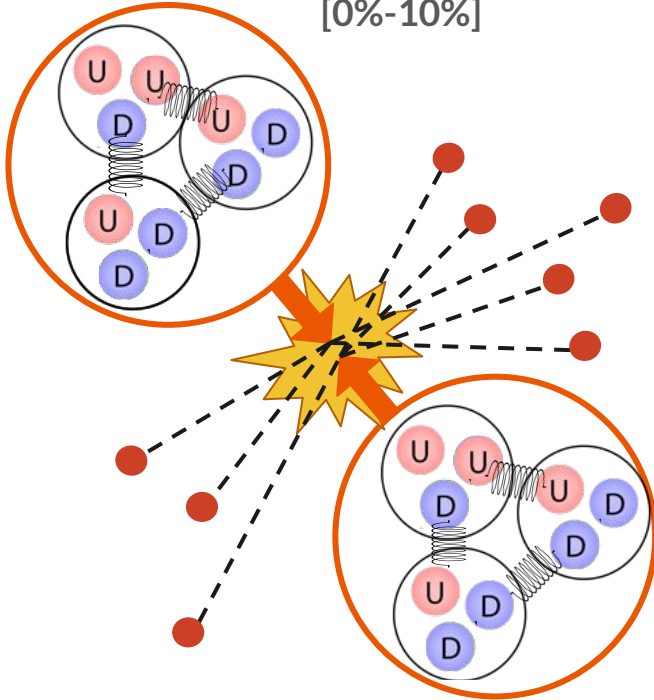
[40%-50%]



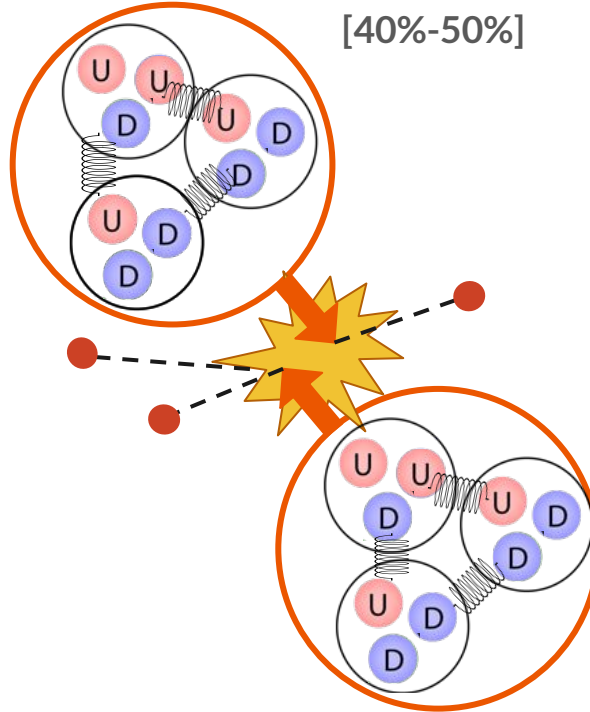
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



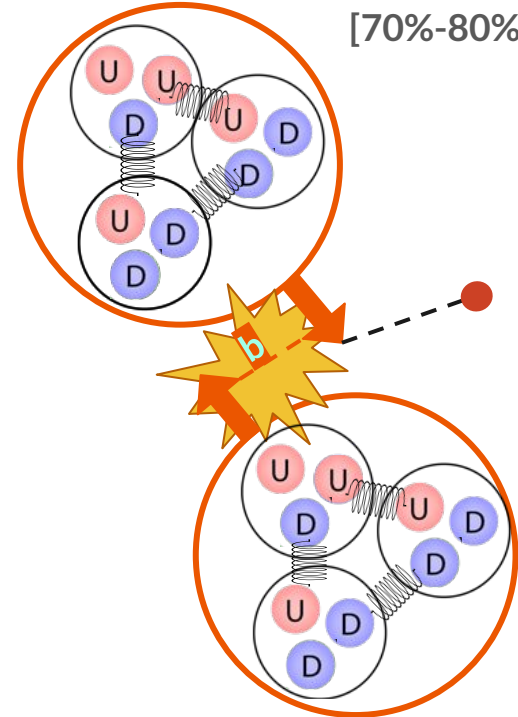
[0%-10%]



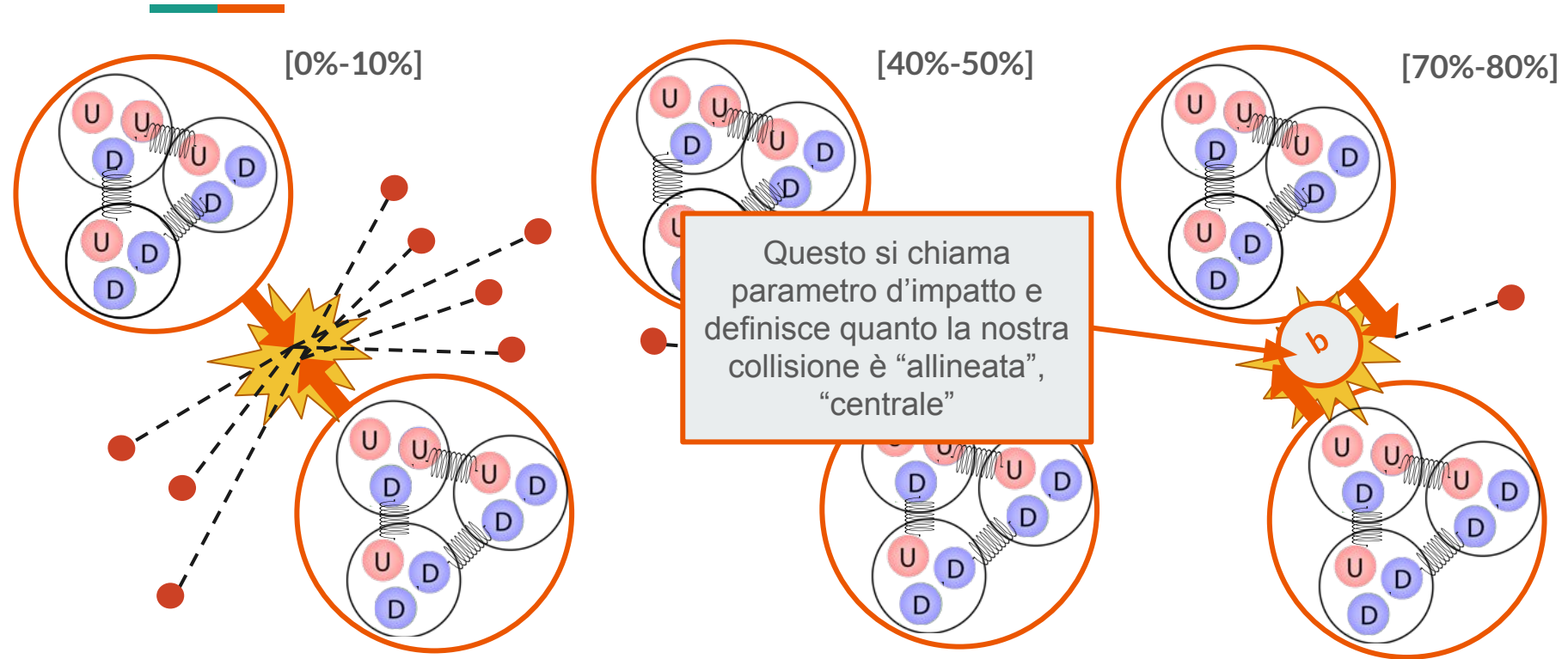
[40%-50%]



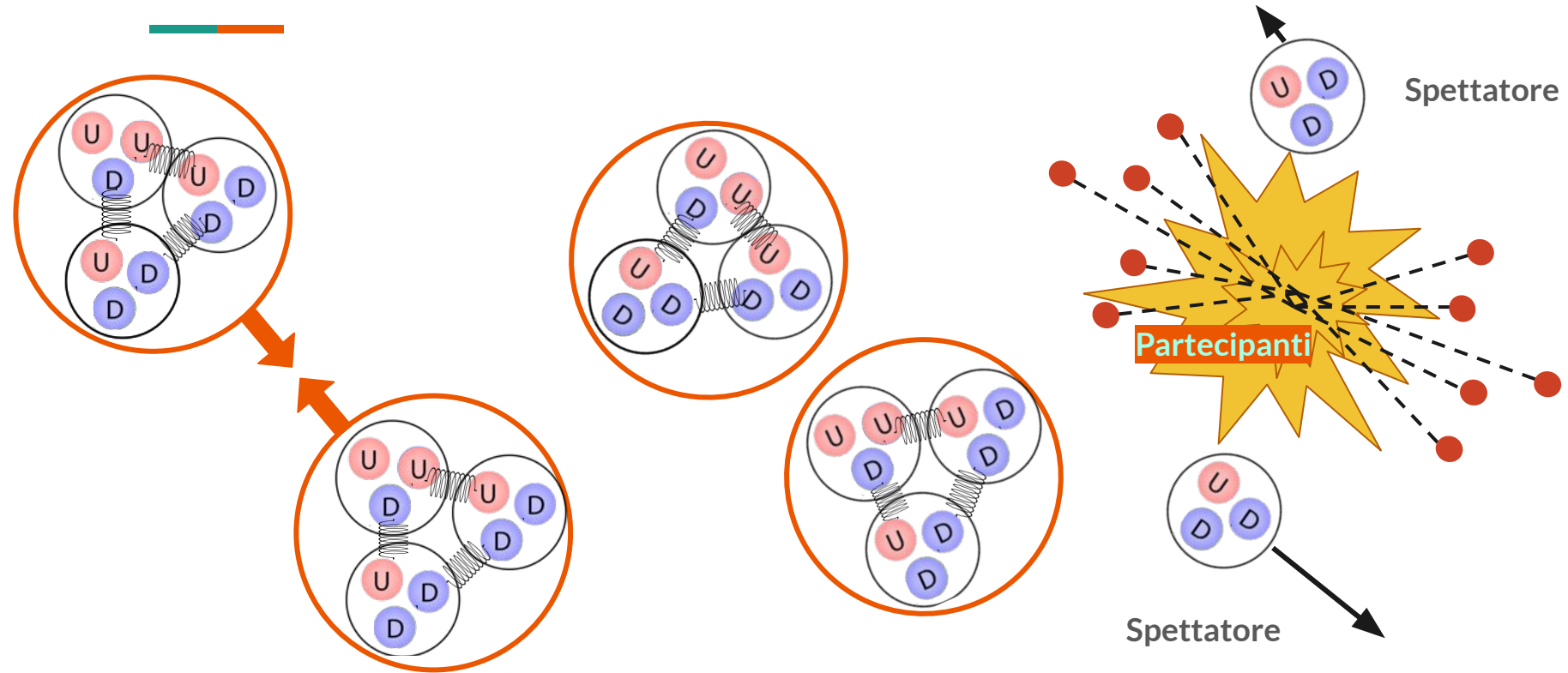
[70%-80%]



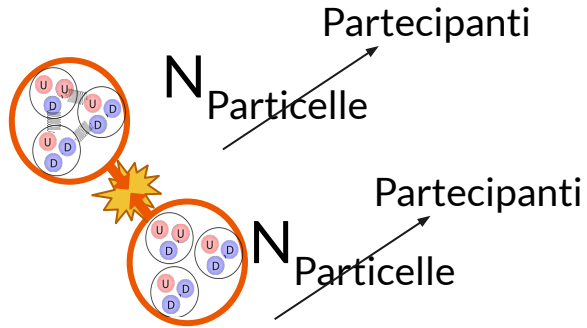
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



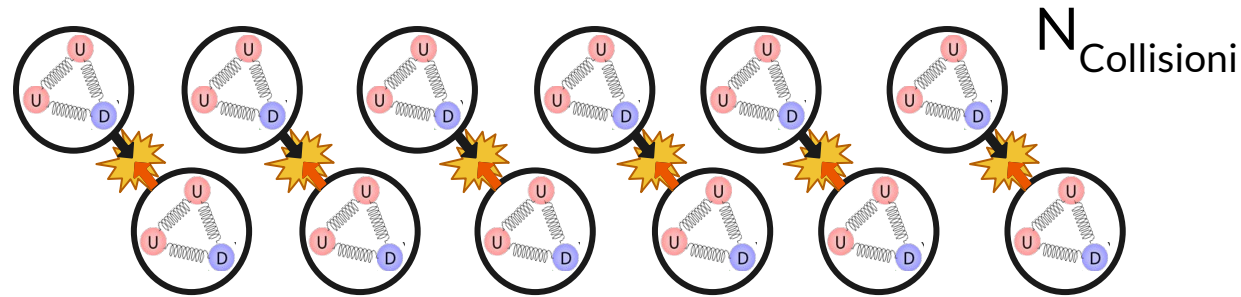
Particelle Strane: abbiamo centrato il bersaglio?



Collisioni adroniche: Aumento di stranezza

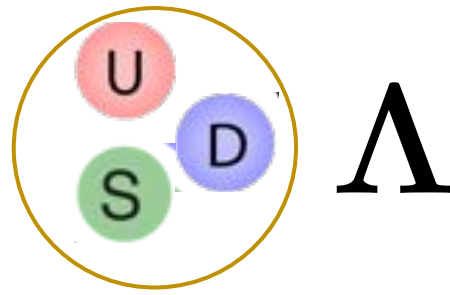


$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} > 1$$

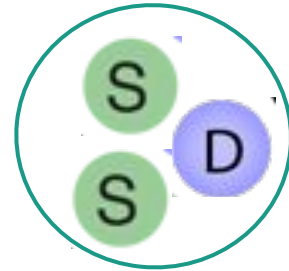


$$\frac{\text{Pb-Pb}}{\text{p-p} \times N} = 1$$

Rivelare le
particelle strane



Λ



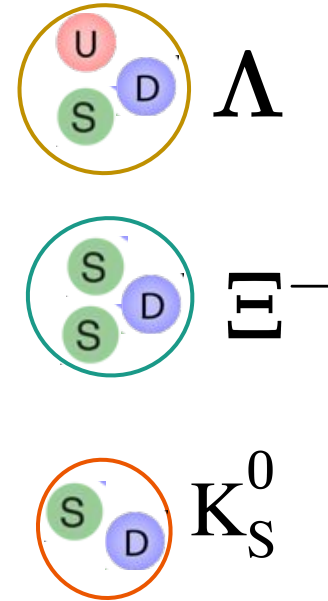
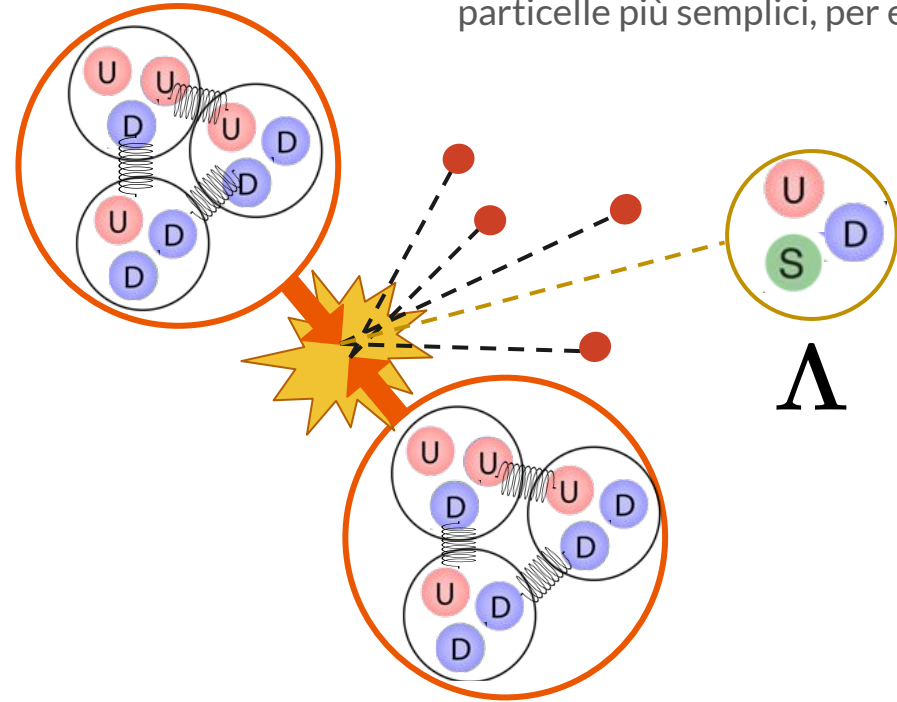
Σ^-



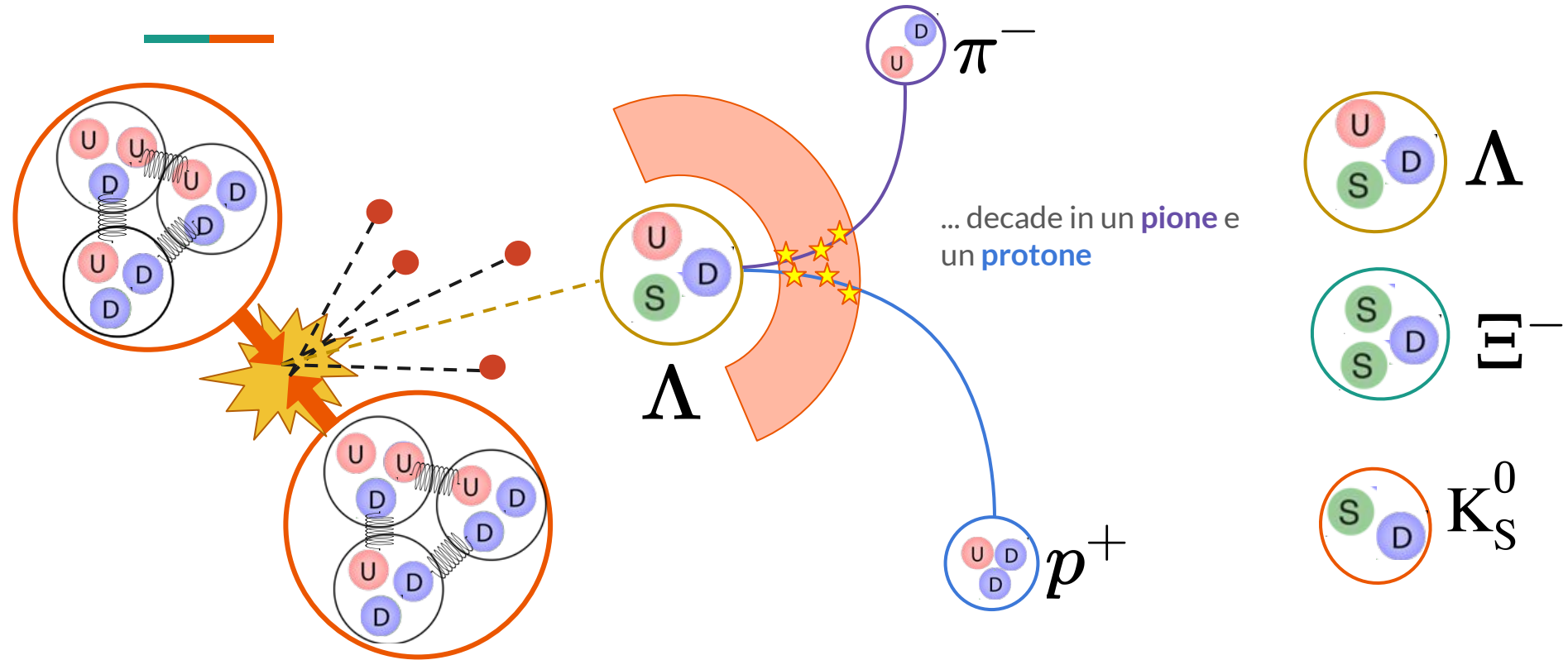
K_S^0

Particelle Strane e come trovarle

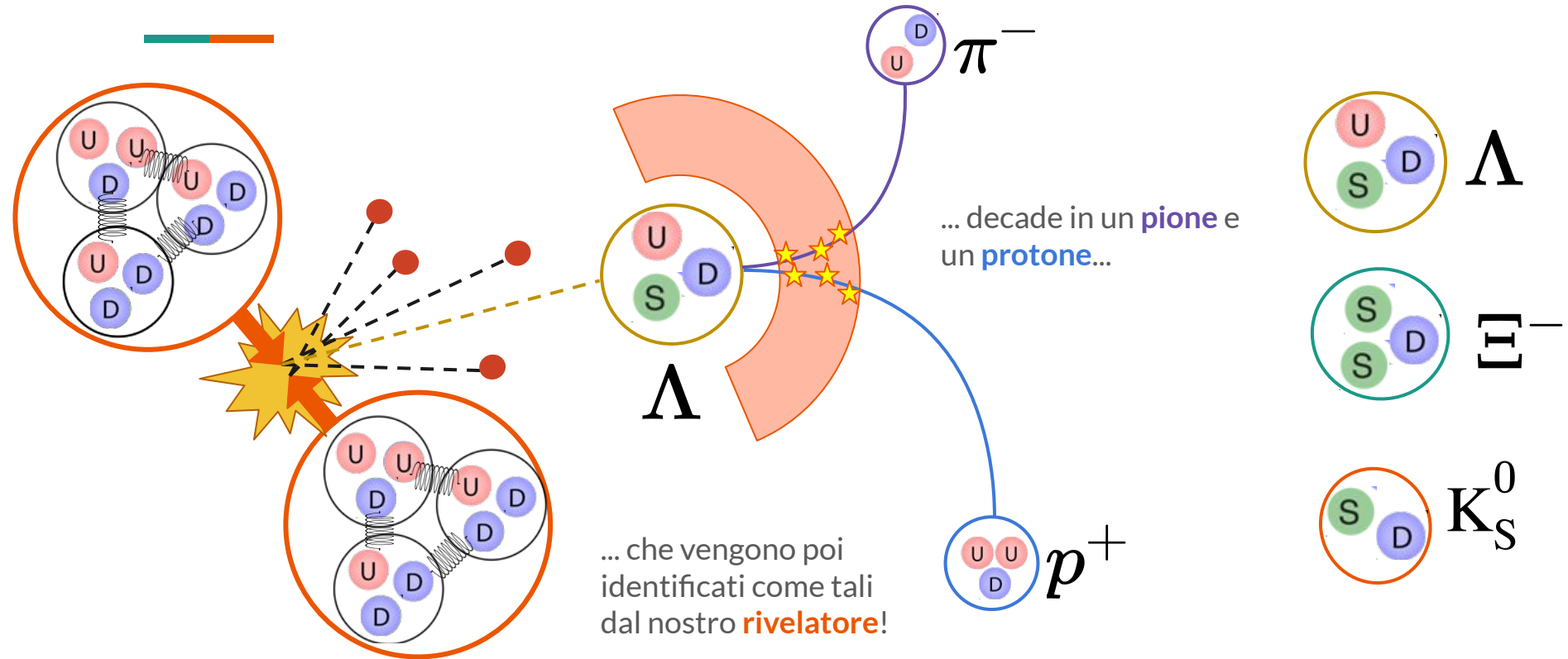
Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...



Particelle Strane e come trovarle

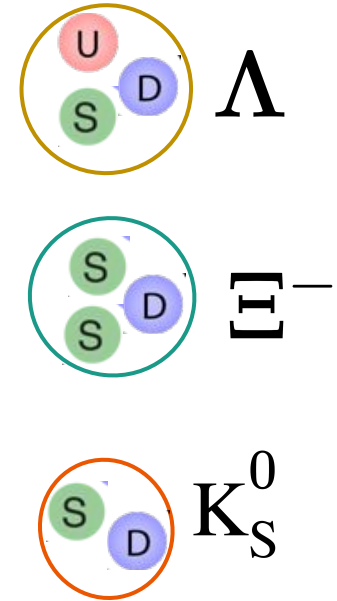
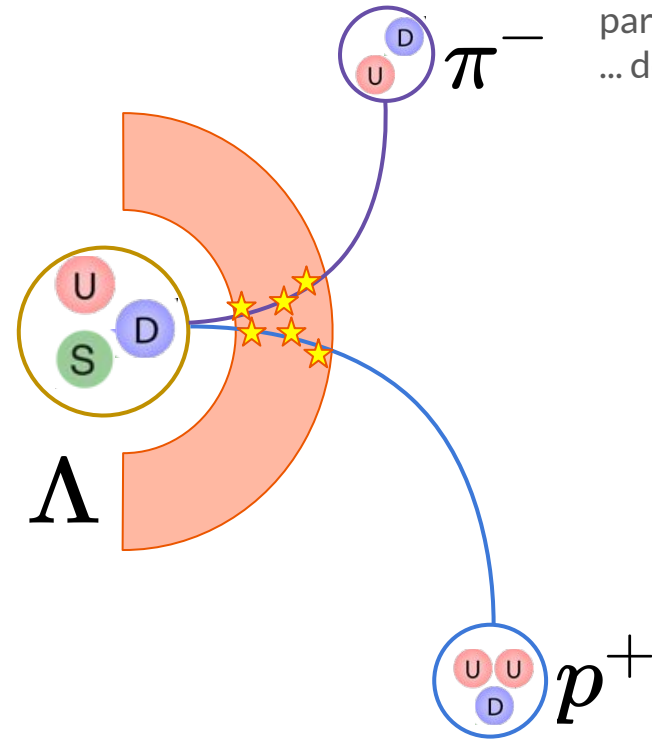


Particelle Strane e come trovarle

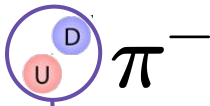


Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...
... decade in un **pione** e un **protone**...



Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

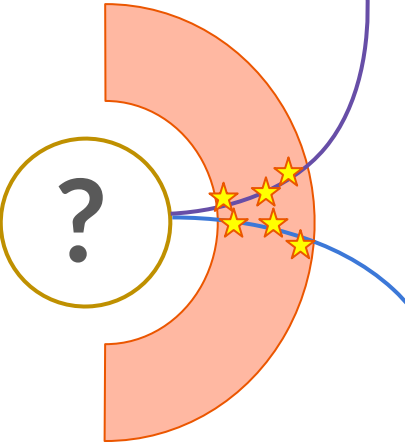
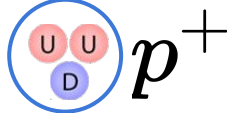
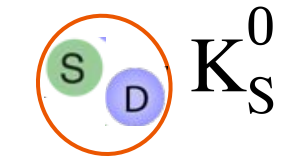
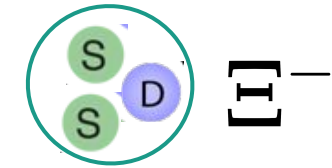
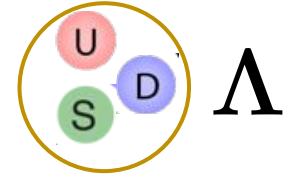


Dopo pochi centimetri le particelle **strane** decadono in particelle più semplici, per esempio una **Lambda**...

... decade in un **pione** e un **protone**...

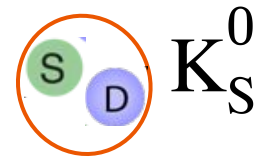
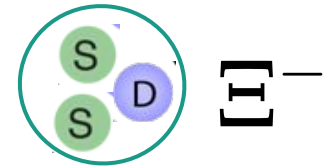
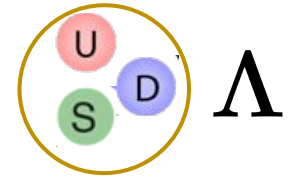
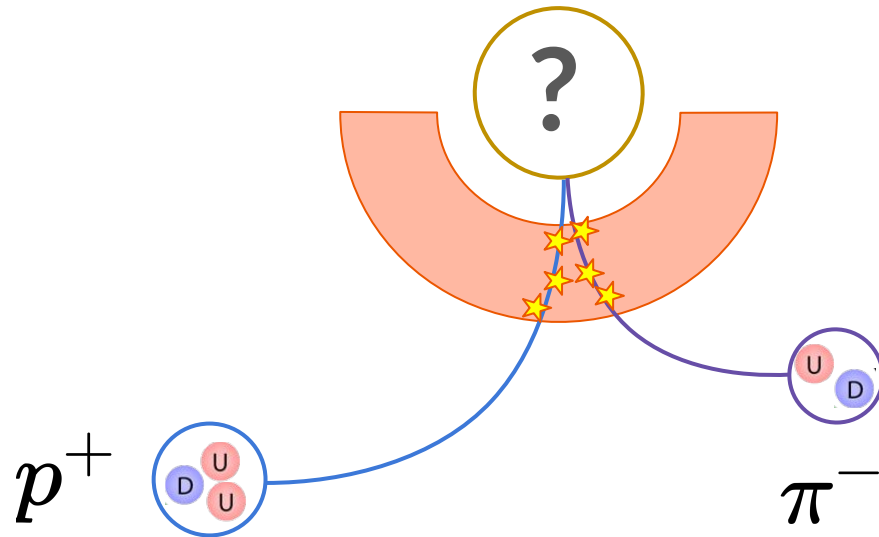
... ma sono veramente da una **Lambda**?

A un primo sguardo non si può capire, però con un po' di statistica lo si può intuire!



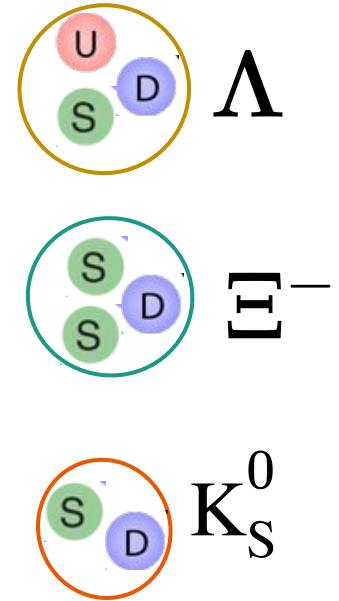
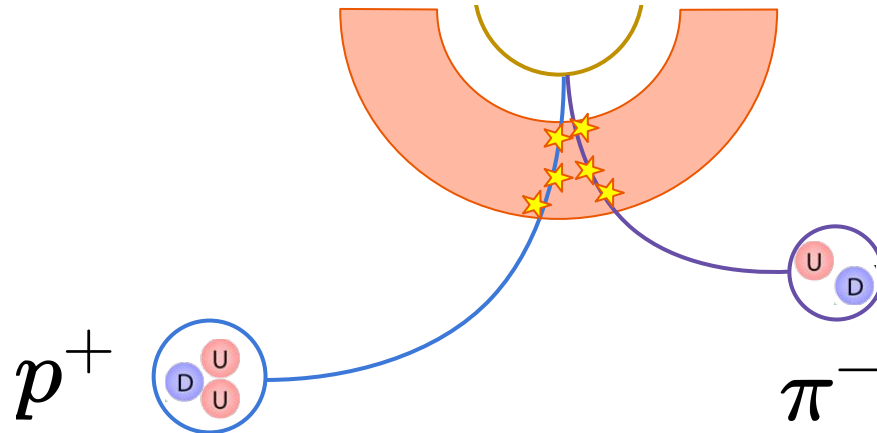
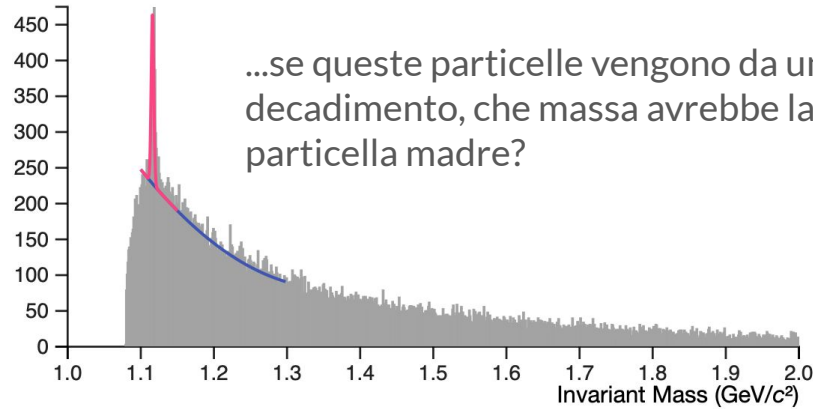
Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

Possiamo combinare le particelle considerando il loro moto in quella che si chiama la **massa invariante**. Questa quantità risponde alla domanda...

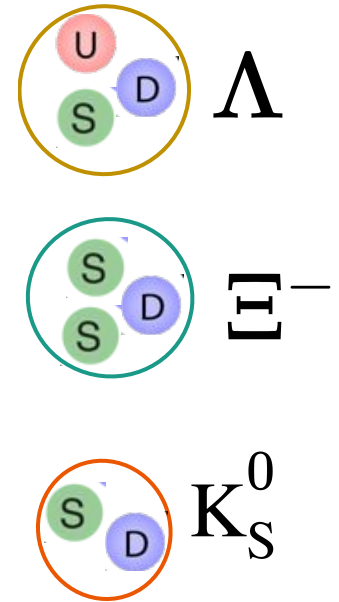
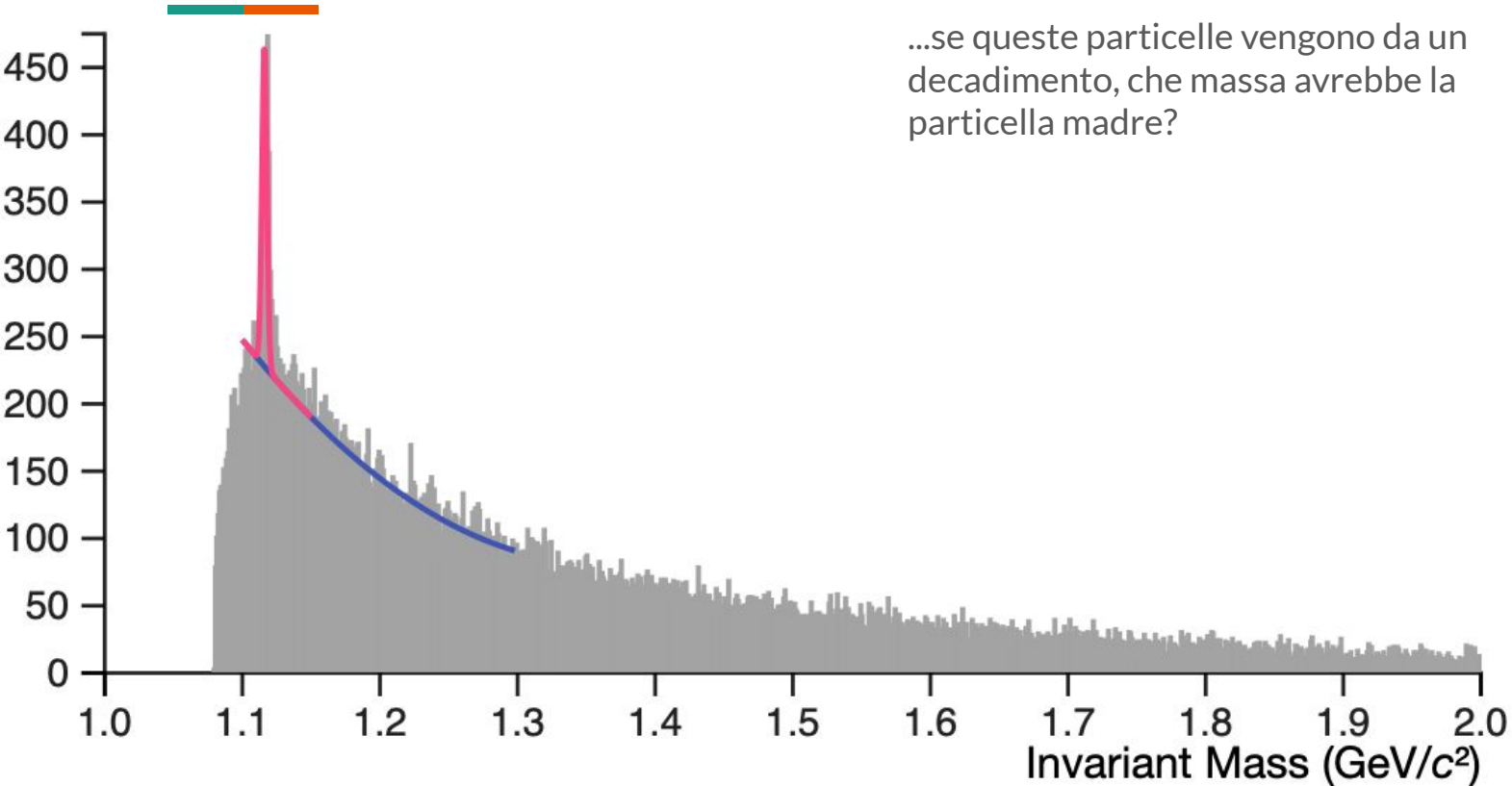


Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

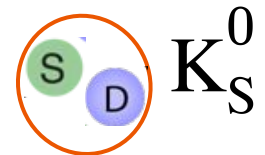
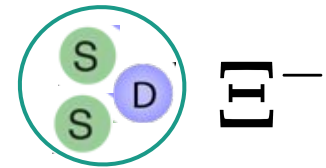
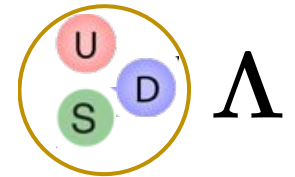
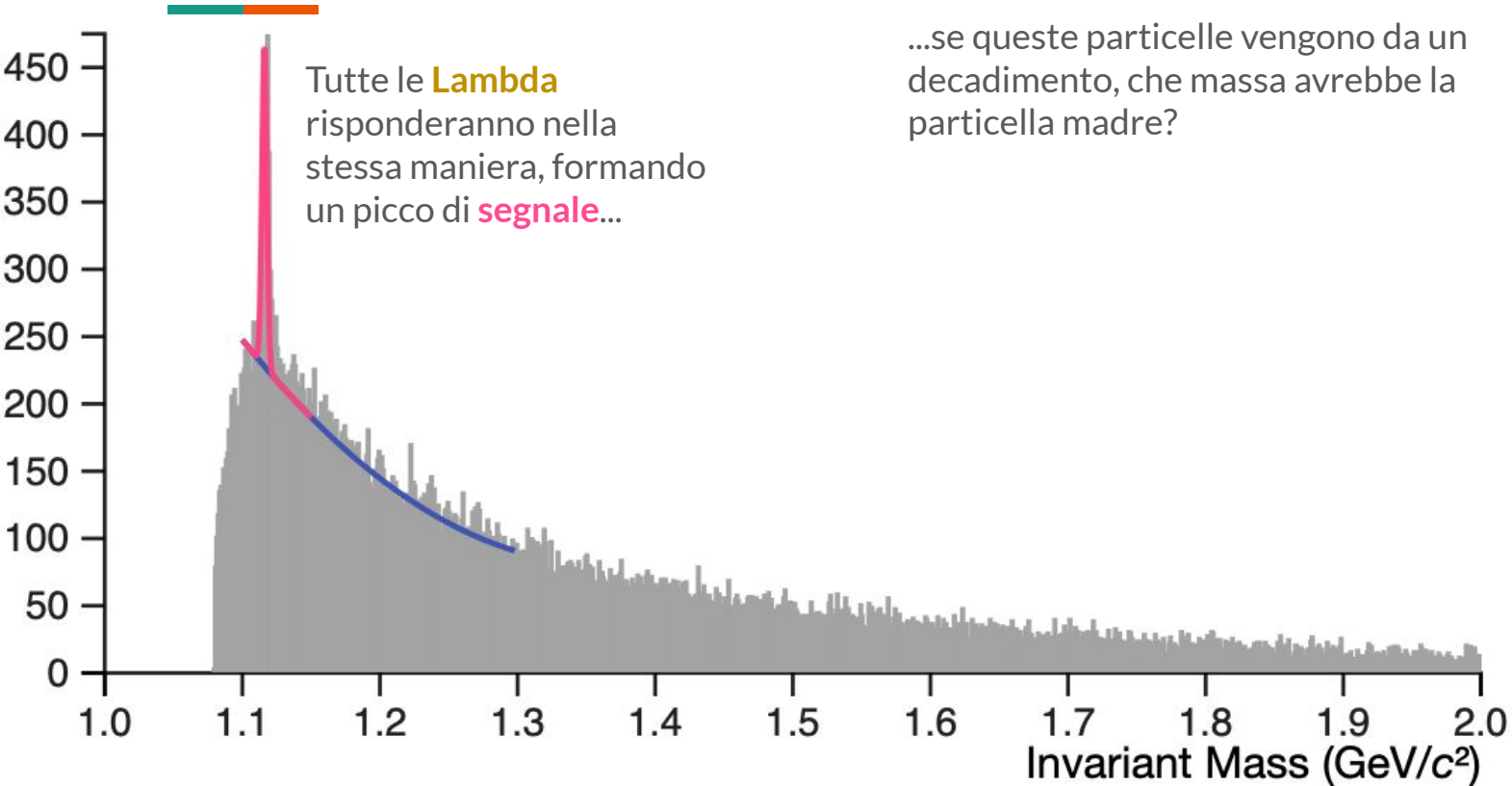
Possiamo combinare le particelle considerando il loro moto in quella che si chiama la **massa invariante**. Questa quantità risponde alla domanda...



Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante



Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante



Particelle Strane e come trovarle: la massa invariante

